



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA  
(UNAN – Managua)**



**Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua  
(CIRA / UNAN)**

**Trabajo de tesis  
Para optar al grado de  
Master en Ciencias del Agua**

**Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en  
Granada, Nicaragua**

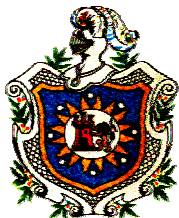
**Jorge Luís Guatemala Herrera  
CARNET 89-07730-3**

**Tutor : MSc. Lener Sequeira Gómez  
Asesor: MSc. Enoc Castillo Hernández  
Asesor: MSc. Francisco Picado Pavón  
Asesor: MSc. Valeria Delgado Quezada**

**Managua, Junio 2007**

**Patrocinado por la Red Centroamericana para el Manejo de los Recursos  
Hídricos (Red CARA)**





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE  
NICARAGUA  
(UNAN – Managua)**



**Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua  
(CIRA / UNAN)**

**Trabajo de tesis  
Para optar al grado de  
Master en Ciencias del Agua**

**Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en  
Granada, Nicaragua**

**Jorge Luís Guatemala Herrera  
CARNET 89-07730-3**

**Tutor : MSc. Lener Sequeira Gómez  
Asesor: MSc. Enoc Castillo Herrera  
Asesor: MSc. Francisco Picado Pavón  
Asesor: MSc. Valeria Delgado Quezada**

**Managua, Junio 2007**

**Patrocinado por la Red Centroamericana para el Manejo de los Recursos  
Hídricos (Red CARA)**



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
(UNAN-Managua)  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de  
Nicaragua, (CIRA-UNAN)



**Maestría en Ciencias del Agua**

El Tema de Tesis:

**“Caracterización de la Estela de Contaminación del Basurero La Joya en Granada, Nicaragua”**

Presentado por: **Lic. Jorge Luis Guatemala Herrera, Carnet No. 89-07730-3**

Sometido al Programa de Maestría en Ciencias del Agua del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua, como requisito parcial para optar al grado de Master en Ciencias del Agua.

Ha sido aprobado por el Tribunal Examinador:

MSc. Sergio Iván Vado Álvarez  
**Presidente**

MSc. Erick Mauricio Lacayo Escobar  
**Secretario**

MSc. Karla Violeta Ubieta Huete  
**Vocal**

Ante mí

PhD. Katherine Vammen

**Coordinadora Programa de Maestría en Ciencias del Agua**



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua, 14 de Junio de 2007

## **DEDICATORIA**

Al altísimo por permitirme estar con vida para aportar un granito de arena a los conocimientos de los problemas ambientales.

A mis hijos; Tania, Jorge, Juan, Luís y Rossy, por soportar el descuido a que fueron sometidos para la culminación de mis estudios y la realización del presente trabajo.

A mis padres, Juan y Margarita por ser tan especiales y apoyarme en todas mis decisiones.

Lic. Maria Auxiliadora Ortega Robleto

Mis hermanos y sobrina, Rosa, Edgar y Jéssica.

A mi familia, todos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al director fundador, maestro Salvador Montenegro Guillén y la Dra. Katherine Vammen del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN), por la confianza depositada en mí, al permitirme realizar los estudios de la Maestría en Ciencias del Agua, así como el apoyo incondicional que se me brindó a lo largo de mis estudios y el trabajo de tesis.

Al MSc. David Bethune, quien a través del Proyecto Red Centroamericana de Recursos Hídricos, auspiciado por la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional, estableció el Programa de Maestría en Nicaragua para permitir la formación de profesionales de alta calidad en el área de los recursos hídricos.

Al Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO/UNAN) dirigido por el MSc. Dionisio Rodríguez por haberme brindado las facilidades de emplear el equipo técnico y el personal con los conocimientos y la experiencia en la aplicación de los métodos geofísicos empleados en este estudio.

A mi tutor MSc. Lener Sequeira por su colaboración en todo el trabajo, al igual que a MSc. Marvin Corriols y MSc. Alfredo Mendoza que me brindaron todo su apoyo en el momento preciso.

A mis asesores MSc. Francisco Picado, MSc. Enoc Castillo y MSc. Valeria Delgado por sus valiosas sugerencias en la etapa de campo, laboratorio y redacción del documento.

A MSc. Yelba Flores por la paciencia en colaborar con el aprendizaje de los SIG

A los especialistas del CIRA/UNAN que colaboraron en las dos campañas de muestreo, Lic. Karla Sarria Sacasa, Miguel Ángel García y Víctor Campos

A todos los amigos y personas que de manera directa o indirecta colaboraron en la ejecución de este trabajo, desde la organización logística hasta la ejecución de los muestreos del CIRA/UNAN.

## INDICE

<b>1.</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Generalidades	1
1.2	Área de estudio	2
1.3	Antecedentes	4
1.4	Planteamiento del problema	5
1.5	Objetivos	7
1.6	Justificación	8
<b>2.</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>12</b>
2.1	Descripción del área de estudio	12
2.2	Clima	14
2.2.1	Datos meteorológicos	15
2.2.2	Precipitación	16
2.2.3	Evaporación	16
2.2.4	Vientos	17
2.3	Geología y geomorfología	17
2.3.1	Relieve y altitud del área	19
2.3.2	Geología regional	19
2.3.3	Geología local	20
2.4	Suelos	24
2.4.1	Capacidad de Infiltración	25
2.5	Hidrología	26
2.5.1	Descripción morfológica de la cuenca	26
2.5.2	Característica hidráulicas	27
2.6	Hidrogeología	28
2.6.1	Unidades hidrogeológicas	29
2.6.2	Recarga del acuífero	29
2.6.3	Dirección de flujo subterráneo	30
2.6.4	Parámetros hidráulicos	30

2.6.5	Explotación del agua subterránea	32
2.7	Geofísica	32
2.7.1	Exploración geofísica aplicada a estudios Hidrogeológicos	32
2.7.2	Fuentes de ruidos	34
2.8	Caracterización Hidrogeoquímica	34
2.8.1	Parámetros físico – químicos en lixiviados de basureros	34
2.8.2	Composición físico - química del agua subterránea	35
2.8.2.1	Características físicas del agua subterránea	35
2.8.2.2	Características químicas del agua Subterránea	36
2.8.2.2.1	Características químicas de los iones disueltos en el agua subterránea	39
2.8.2.2.1.1	Aniones	39
2.8.2.2.1.2	Cationes	42
2.8.2.2.1.3	Metales pesados	44
2.8.3	Contaminantes del agua subterránea generados en los basureros	44
2.8.3.1	Formación de los lixiviados	44
2.8.3.2	Composición de los lixiviados	47
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>50</b>
3.1	Exploración geofísica	50
3.1.1	Procesamiento de datos geofísicos	54
3.2	Toma y preservación de las muestras de agua subterránea y lixiviados	55
3.3	Medición de parámetros de campo en aguas subterráneas y lixiviados	58
3.4	Metodología analítica	59
3.5	Pruebas de Infiltración	60
3.6	Calicatas	62



3.7	Lixiviados	63
<b>4.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>64</b>
4.1	Suelos	64
4.2	Infiltración	72
4.3	Hidrología e hidrogeología	75
4.4	Geología y geofísica	80
4.5	Hidrogeoquímica y lixiviados	84
4.5.1	Lixiviados	84
4.5.1.1	Producción de lixiviados	84
4.5.1.2	Transporte de lixiviados	86
4.5.2	Hidrogeoquímica	88
4.5.2.1	Carácter hidroquímico de las aguas subterráneas	88
4.5.2.2	Evaluación del agua subterránea y los lixiviados	91
4.5.2.2.1	Parámetros de campo	91
4.5.2.2.2	Composición físico-química del agua subterránea y lixiviados	101
4.5.2.2.3	Evaluación de la carga de Contaminantes	125
4.5.2.2.4	Metales pesados	131
4.6	Resumen de resultados encontrados en el estudio	151
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>157</b>
<b>6.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>159</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>162</b>

## INDICE DE CUADROS

Tabla 1	Origen y frecuencia de residuos que llegan al basurero	13
Tabla 2	Caracterización de los desechos sólidos en la ciudad de Granada. (CIRA, 1995)	14
Tabla 3	Infiltración básica en suelos (CIRA – CARA, 2003)	25
Tabla 4	Transmisividades medidas en los pozos de ENACAL Granada, (Espinosa, M. 1999).	31
Tabla 5	Valores de los principales parámetros en fases de degradación anaeróbica (fermentación ácida y Metanogénica) cuantificados en lixiviados (Ehrig, 1999)	49
Tabla 6	Coordenadas de los SEVC realizados en el sector del basurero La Joya	54
Tabla 7	Parámetros físicos-químicos analizados en lixiviados del basurero y en el agua subterránea de pozos y minipiezómetros ubicados en área de estudio en Granada.	56
Tabla 8 a y 8 b	Resultados de parámetros físico – químicos de los puntos muestreados en ambas épocas de muestreo en Granada	102 – 103
Tabla 9	Clasificación de las aguas según la dureza (Hem, 1989)	109
Tabla 10 a y 10 b	Resultados de los análisis de metales pesados en Granada	132-133

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación del basurero la Joya y el área de influencia	3
Figura 2	Provincias geológicas Nicaragüenses (Hodgson, V. G. 1998)	18
Figura 3	Secuencia litológica del área de la subcuenca hidrogeológica de Granada (Espinoza, M. 1999)	21
Figura 4	Mapa geológico del área (SGN, 1973 en Espinoza, M. 1999; Ferrey & Williams en IGN, 1971)	23
Figura 5	Modelo conceptual del movimiento de lixiviados en rellenos sanitarios	45
Figura 6	Arreglo para la elaboración de una pseudosección eléctrica	51
Figura 7	Ubicación de los SEVC, campo de pozos y basurero La Joya	53
Figura 8	Tipos de suelos en el área de estudio y la ubicación de calicatas y pruebas de infiltración ejecutadas en el área (INETER 1971)	66
Figura 9	Características de los horizontes del suelo, sector del basurero Calicata No. 1 y Calicata No. 2	68
Figura 10	Calicata 1 Al Norte del basurero en suelos franco arcillosos	69
Figura 11	Calicata 2 sector este del basurero, suelos franco-arenosos-pedregosos	70
Figura 12	Precipitación media mensual (1958-1998). Estación INA-Granada.	76
Figura 13	Ubicación del basurero La Joya y dirección del flujo subterráneo	78
Figura 14	Gradientes hidráulicos (Niveles Dinámicos) y dirección de flujo de agua subterránea desde el campo de pozos El Escudo al campo de pozos Quinta Ena.	79
Figura 15	Sección eléctrica SEVC realizados en el basurero La Joya de Granada (distancia y profundidades en metros).	81
Figura 16	Resistividad eléctrica multicapa, 0 m a 60 m de profundidad en el área del Basurero La Joya	83
Figura 17	Distribución de la precipitación media mensual y del volumen de lixiviados producidos, estimaciones por el método balance hídrico (CIRA/PROCONSUL S.A, 1995) y aplicación del método propuesto por Ehrig (1999)	85

Figura 18	Tipo de agua en el área de estudio, clasificada mediante el diagrama de Piper en verano (a) e invierno (b).	88
Figura 19	Diagrama de pH – Eh presentando la tendencia oxido reducción de los puntos muestreados	97
Figura 20	Zonificación geoquímica de la estela de contaminación en un basurero de alto contenido orgánico (Fetter, 1999; modificado).	98
Figura 21	Distribución espacial de las conductividades ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ ) en el área del basurero y parte de la cuenca hidrogeológica de Granada	106
Figura 22.	Diagrama Eh - pH para el sistema del nitrógeno.	120
Figura 23	Concentraciones de nitratos y amonio en las agua subterráneas y en lixiviados del basurero de Granada (MP-03) en época seca y lluviosa.	123
Figura 24	Correlación lineal entre las concentraciones de COD en agua subterránea de la zona de Granada obtenidas mediante UV a 254 nm y analizador de carbono orgánico total marca Shimatzu TOC-500.	125
Figura 25	Distribución espacial de la materia orgánica en forma de COD ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) en el área del basurero y parte de la cuenca hidrogeológica de Granada	127
Figura 26	Concentraciones de Al en pozos y minipiezómetros en época de verano e invierno.	136
Figura 27	Concentración de metales pesados Arsénico (As), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Cromo (Cr) cuantificados en minipiezómetros ubicados en el basurero (MP-03) y en la zona de descarga (MP-04, MP-06, MP-07)	142
Figura 28	Concentración de metales pesados Litio (Li), Manganeseo (Mn), Plomo (Pb) y Níquel (Ni) cuantificados en minipiezómetros ubicados en el basurero (MP-03) y en la zona de descarga (MP-04, MP-06, MP-07)	147

## **INDICE DE ANEXOS**

### **Anexo 1**

- Datos de precipitación
- Balance hídrico para el cálculo de lixiviados (CIRA/PROCÓNSUL, S.A, 1995)
- Comparación del método del balance hídrico y el método propuesto por Hans – Jürgen Erhig (1999) para el cálculo de la cantidad de lixiviados

### **Anexo 2**

- Inventario de pozos en el área de estudio
- Metodología para el análisis de muestra de agua y lixiviados, Procedimientos Operacionales Normalizados (PON) para el análisis de muestras de agua
- Parámetros de campo medidos en el área de estudio para las dos épocas de muestreo (seca y lluviosa)
- Resultados físico-químicos obtenidos en los análisis realizados en los muestreos del área de estudio
- Valores guías de calidad de agua para consumo humano, normas CAPRE (1994)
- Valores guías para la calidad del agua potable en Volumen 2, Criterios relativos a la salud y otra información. OPS (1987)

### **Anexo 3**

- Datos de campo de las pruebas de infiltración
- Gráficos de los datos de infiltración
- Tasas de infiltración obtenidas en área de estudio de acuerdo al tipo de suelo existente
- Coeficientes de infiltración propuestos por Schosinsky y Losilla (2000)
- Determinación del porcentaje de infiltración

- Formato para la toma de datos de los perfiles en las calicatas (Guía descriptiva de suelos de la FAO, 1977)
- Descripción de los diferentes tipos de suelos presentes en el área de estudio (INETER, 1971)

#### **Anexo 4**

- Imágenes y gráficos de resistividad eléctrica en los sondeos eléctricos verticales continuos (SEVC)
- Fotografías del Equipo SAS 4000

#### **Anexo 5**

- Fotografías del área de estudio

## Abreviaturas

Ac. & Gr.	Aceites y grasas
CAPRE	Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana
CARA	Red Centroamericana para el Manejo de los Recursos Hídricos
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS)
CIRA	Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua
COD	Carbono orgánico disuelto
CV	Color verdadero
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
ENACAL	Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillado
E	Este
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, Nicaragua
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
km <sup>2</sup>	Kilómetros cuadrados, unidad de área
LC	Lago Cocibolca
LD	Límite de detección del método
LMA	Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)
m <sup>2</sup> /d	Unidad de transmisividad en metros cuadrados por día
mm	Milímetros, unidad de magnitud de lluvia
m <sup>3</sup> /d	Metros cúbicos por día, unidad de volumen por día
m	Metros, unidad de longitud
msnm	Metros sobre el nivel del mar, unidad de elevación
mmca	Millones de metros cúbicos al año, unidad de gasto de agua
mg.l <sup>-1</sup>	Miligramos por litro, unidad de concentración química
meq.l <sup>-1</sup>	Milliequivalentes por litro, unidad de concentración química
MINSA	Ministerio de salud, Nicaragua
MP	Minipiezómetro

N	Norte
ND	Compuesto no detectado
Ohmm	Ohmio – metro, unidad de resistividad eléctrica
ONGs	Organizaciones no gubernamentales
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
PON	Procedimientos Normalizados Operacionales
PP	Pozo perforado
PE	Pozo excavado
Redox	Potencial oxido reducción
REPTINIC	Empresa curtidora de cuero sociedad anónima situada en la ciudad de Granada
RES2DINV	Inversión de resistividades en dos dimensiones
SEVC	Sondeos eléctricos verticales continuos
SGN	Servicio Geológico Nacional, Nicaragua
STD	Sólidos totales disueltos
S	Sur
UNAN	Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
UTM	Unidad Transversal de Mercator
W	Oeste
°C	Grados centígrados, unidad de temperatura
$\mu\text{Scm}^{-1}$	micro siemens por centímetro, unidad de conductividad eléctrica



## **RESUMEN**

**Jorge Luís Guatemala Herrera**

### **Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en granada, Nicaragua.**

**2007**

**Palabras Claves:** Lixiviados, Estela, Aguas Subterráneas

El área de estudio se ubica a orillas del Lago de Nicaragua o Cocibolca en la parte noroeste del mismo y su extensión es aproximadamente de 58.4 km<sup>2</sup>. En el sector noreste de la subcuenca en estudio se ubica la ciudad de Granada; una de las ciudades de mayor importancia en Nicaragua. Sin embargo, desde hace dos décadas, los desechos domésticos e industriales generados por su población (17,735 ton/año) son depositados sin ningún tipo de tratamiento en una depresión natural, aparentemente una hoya magmática colapsada. Esta es un área altamente vulnerable compuesta de material volcánico muy permeable y atravesada por un serie de fallas, fracturas y alineamientos asociadas al graben o fosa tectónica conocida como Depresión Nicaragüense.

Las condiciones del suelo del lugar, y el tiempo de acumulación de los desechos, han favorecido la transformación de los mismos, a través de procesos físicos, químicos y biológicos. Las sustancias generadas por estas transformaciones se denominan lixiviados y son removidas por la infiltración de las lluvias y por la formación de escorrentías superficiales, lo que origina que estas sustancias tengan un movimiento vertical y horizontal a través del medio hidrogeológico, generando una estela de contaminación.

Con el fin de determinar esta estela o pluma de contaminación en el medio acuífero, se contemplaron los siguientes objetivos: a) caracterizar químicamente los lixiviados, b) delimitar la extensión alcanzada por la estela de contaminación y c) evaluar el posible impacto de los lixiviados en el acuífero de donde se extrae el agua para consumo. El estudio se llevó a cabo en el período comprendido entre verano e invierno del año 2003 – 2004 (noviembre a octubre); estableciendo como parámetros indicadores los tipos de compuestos constituyentes de los lixiviados y las condiciones hidrogeológicas de la zona.

La caracterización de los lixiviados así como la de las aguas subterráneas fue determinada mediante mediciones de campo y análisis físicos y químicos realizadas por el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua). Las dimensiones de la estela de contaminación se determinaron con el método geofísico tomografía eléctrica, con apoyo y equipos

facilitados por el Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO/UNAN). El impacto de los lixiviados en el acuífero, se basó en estudios hidrogeológicos previos ejecutados en el área (Espinoza, 1999; CIRA, 1995; PNU-SGN, 1973) y en pruebas de infiltración y calicatas realizadas en este estudio.

Las concentraciones de los iones disueltos en el agua subterránea están dentro de los valores normales para agua subterránea no contaminada; a excepción de los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga del agua subterránea donde se presentan algunas alteraciones que suelen estar asociadas a contaminación antropogénica. Concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Fe total, B total,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , llegan a superar los límites máximos admitidos por la norma CAPRE para agua potable y cuya fuente probable este asociada a los lixiviados que se generan en el basurero.

La composición de los lixiviados es muy similar a la de otros basureros analizados en Latinoamérica; lo que depende principalmente de los tipos de residuos que deposita la población. Entre los compuestos sobresalen los metales pesados (Cr, Cd, Ni y Pb); altas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y de carga contaminante expresada a través de COD,  $\text{DBO}_5$  y DQO. A pesar de que los compuestos analizados están dentro del rango típico esperado para lixiviados, éstos representan un riesgo para la calidad del agua subterránea de la zona ya que la características del basurero permiten que todas las sustancias lixiviadas se dirijan a la zona saturada y posteriormente a la zona de descarga final en el lago de Nicaragua o Cocibolca.

La estela de contaminación en el basurero, delimitada por 5 sondeos eléctricos verticales realizados tanto a lo ancho como a lo largo del área circundante, ha alcanzado un espesor aproximado a los 50 m, disminuyendo a unos 10 m en los alrededores debido a la dispersión lateral y vertical en el medio hidrogeológico cercano al basurero.

Las concentraciones de elementos y compuestos analizados en los lixiviados y algunos de los analizados en el agua subterránea dan evidencia de una alteración en las características naturales del agua subterránea, que ha impactado en el medio hidrogeológico. Este impacto ha empezado a manifestarse con aumentos de concentraciones de algunos elementos en los puntos ubicados en dirección gradiente abajo del flujo subterráneo desde el basurero, como se observa en los resultados de algunos pozos y minipiezómetros. Bajo las condiciones existentes hay alta probabilidad de que el basurero tenga un impacto negativo en parte del acuífero de Granada y por ende en la salud de la población que se abastece con agua de los campos de pozos del sitio afectado.

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Generalidades**

El Departamento de Granada está formado por 4 Municipios; Granada, Diriá, Diriomo y Nandaime, su extensión territorial es de 592.07 km<sup>2</sup> y su población de 168,186 habitantes, lo que representa el 3,27% de la población del país (INEC, 2005).

El municipio de Granada se sitúa a orillas del Gran Lago de Nicaragua o Cocibolca, en el margen noroeste, a una elevación media de 65 msnm. Es una de las ciudades de mayor importancia en Nicaragua desde el punto de vista comercial, turístico e industrial, sus principales industrias son: jabonerías, procesamiento de aceite vegetal, curtiembres y aserríos. El 95% de la población cuenta con una cobertura de servicio de agua potable de origen subterráneo, la que es extraída a través de pozos ubicados al sur de la población.

Más al suroeste del campo de pozos se encuentra el sitio donde la municipalidad dispone los desechos sólidos domésticos desde hace aproximadamente 23 años (1983), al cual se le ha llamado La Joya (Figura 1). El basurero está localizado en una depresión natural (probablemente una hoya magmática); el cual no cuenta con lineamientos ni técnicas que prevengan fugas de lixiviados. Esto representa un riesgo de contaminación para la subcuenca hidrogeológica y el manto acuífero que abastece de agua potable a la población.

La creciente demanda de agua fue estimada en 1973 por el PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) a través de la tasa de crecimiento poblacional que era del 3.25% para esa época. En ese momento se estimó que la población para 1998 sería de 88 153 habitantes (la mitad de la población actual para éste mismo año) con un requerimiento de 9.33 mmca (millones de metros cúbicos anuales) de agua. El requerimiento de agua por parte de la población en el 2005 fue de 11.60 mmca; tomando en cuenta un consumo promedio diario de

189 l/hab/día de acuerdo a las normas técnicas para abastecimiento de agua potable del Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados (INAA, 2001).

En agosto de 1997, la compañía KOKUSAI KOGYO CO. LTD., realizó la impermeabilización del basurero La Joya, con financiamiento de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA). La impermeabilización se realizó con suelo arcilloso, para de esta manera continuar con la disposición de la basura. Asimismo, se recomendó colocar la basura en celdas separadas por capas de material arcilloso de 0.10 a 0.15 m de espesor.

El riesgo de contaminación que representa el basurero La Joya para el acuífero, puede convertirse en un problema de calidad de las aguas y afectar la salud de la población que se abastece de este recurso debido a que la principal batería de pozos: Escudo y Quinta Ena (Figura 1) de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL) y de comunidades ubicadas al sur de Granada (Pantanal), se sitúan a una altura menor con respecto a la del basurero y en la misma dirección del flujo subterráneo.

## **1.2 Área de estudio**

La subcuenca donde se ubica el basurero La Joya está situada políticamente en el municipio de Granada entre las coordenadas UTM 1308000–1319000 norte y 608000-617000 este, contenidas en las hojas topográficas Granada (3051-IV), Masaya (2951-I), Nandaime (2951-II) e isla Zapatera (3051-III) a escala 1:50000 (INETER, 1988).

El área de la subcuenca es de unos 58.43 km<sup>2</sup>. El basurero se encuentra a 4 km al sur de la ciudad de Granada y aproximadamente 2 km al suroeste del campo de pozos de Quinta Ena (Figura 1). Ocupa una depresión natural con la forma de un cono truncado, aparentemente una hoya magmática colapsada. Las coordenadas UTM del cuadrante del basurero son; 611694E – 1315238N, 611601E – 1315133N, 611751E – 1315113N, 611857E – 1315189N, con una elevación topográfica media del borde superior del cráter de 100 msnm y una profundidad

aproximada de 40 m, el área superficial del basurero es aproximadamente de unos 0.02 km<sup>2</sup> (21737.83 m<sup>2</sup>).

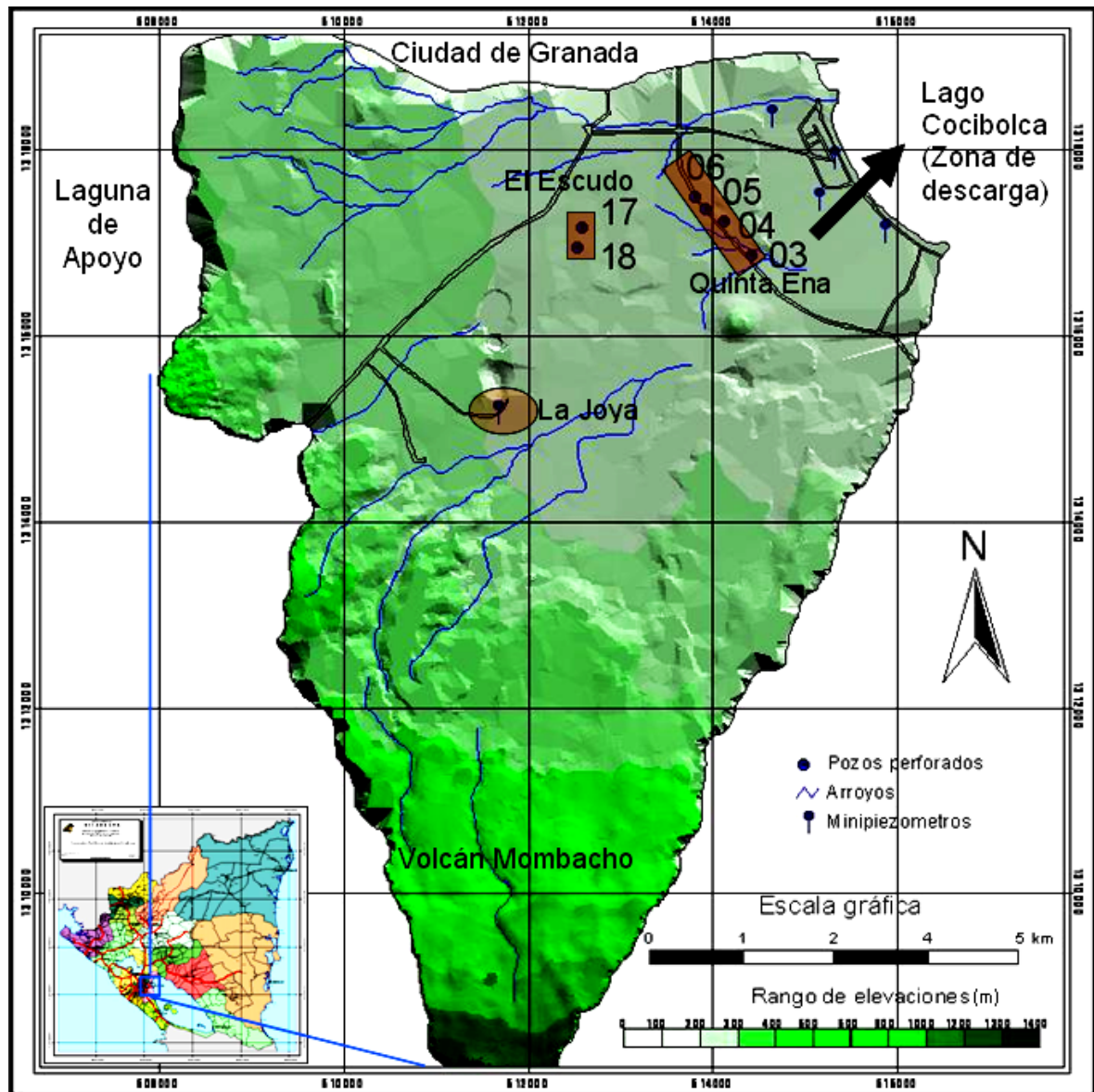


Figura 1. Ubicación del basurero La Joya y el área de influencia.

### **1.3 Antecedentes**

En el año 1524 se fundó la ciudad de Granada por Francisco Hernández de Córdoba, siendo una de las primeras ciudades en América. En 1879 se inició el abastecimiento de agua a unos 10 000 habitantes. El agua se transportaba desde los manantiales de Quismapa, ubicados en las faldas del Volcán Mombacho. En 1887 se fundó la Compañía Aguadora de Granada S. A. y ya para 1913 con aumento de la demanda se captó agua de otros manantiales (Cutirre, La Pita y El Zapotal) que bajaban por gravedad de las faldas del Mombacho. De 1913 a 1943 se hizo uso del agua del Lago Cocibolca para abastecer a la población, pero es hasta finales de la década de los años 50 que se inicia la explotación del agua subterránea a través de pozos al sospechar de la mala calidad del agua del lago y al valorar los costos se requería de inversión para el tratamiento que la municipalidad no podía asumir.

Desde 1973 se han venido desarrollando estudios para valorar el potencial del acuífero de la zona y cumplir con la creciente demanda, además de resolver problemas de la salinización de pozos que se empezó a detectar en la parte norte de Granada (PNUD - DENACAL – S.G.N., 1973; Hecht, 1995; CIRA, 1995; Krasny et al 1998; Espinoza, 1999).

En el presente el área de Granada ha sido objeto de varios estudios debido a su potencial hídrico para el abastecimiento de la población con agua subterránea, así como el abastecimiento para el riego potencial de la zona pacífica, con aguas del Lago Cocibolca. En la actualidad, uno de los problemas que ha adquirido gran importancia por su impacto sobre el área potencial de explotación del agua subterránea y de la mayor reserva superficial de agua dulce que cuenta el pacífico, es la generación de lixiviados por el basurero municipal La Joya. Tradicionalmente, los sitios utilizados en el país para la disposición de los desechos sólidos, no aplican los criterios y técnicas de evaluación de impacto ambiental para su ubicación; además de que no hay control sobre estos sitios ni de los lixiviados que generan. En el país, solamente el 13% de los sitios utilizados

para disposición de desechos sólidos cuentan con autorización sanitaria del Ministerio de Salud –MINSA (CEPIS, 2000).

En Nicaragua, debido a la creciente demanda y al deterioro en la calidad de las aguas superficiales, el suministro de agua potable se realiza a través de las fuentes de agua subterránea hasta en un 73% (Cuerpo ingeniero USA, 2001); por lo que los lixiviados representan un peligro potencial para los acuíferos.

La falta de estudios en donde se haya caracterizado y evaluado la influencia de los lixiviados en las aguas subterráneas en Nicaragua, ha promovido el interés de universidades, municipalidades y organismos no gubernamentales (ONG's), preocupados por los problemas ambientales y sanitarios que generarían estos lixiviados en los recursos hídricos subterráneos como en la atmósfera, siendo unos de los primeros trabajos realizados para el estudio del basurero La Joya la caracterización y dotación de la basura domiciliar generada en la ciudad de Granada, en el Proyecto Generación de las Bases Científico Técnicas y Sociales para la Formulación de un Plan de Saneamiento de Granada y su Área de Influencia (CIRA, 1995).

#### **1.4 Planteamiento del problema**

El desarrollo no planificado de la población, aumentos en la demanda de alimentos, agua y vivienda vienen ejerciendo presión sobre los recursos naturales del país, la explotación de estos recursos y la disposición inapropiada de los desechos generados por su utilización conllevan a un deterioro de la calidad de vida.

Uno de los problemas fundamentales que se presentan en el país son los desechos sólidos municipales. Su disposición final en las áreas destinadas para ese fin provoca una afectación directa sobre el entorno. Se genera una alteración paisajística acompañada de emanaciones de olores y gases desagradables al olfato y en muchos de los casos nocivos para la salud (como el metano, CO<sub>2</sub>, metales pesados incorporados al aire por la combustión espontánea en el

basurero, etc.), proliferación de vectores causantes de enfermedades (roedores e insectos), degradación de la basura a través de las reacciones bioquímicas producidas en el interior del basurero causadas por el ingreso de agua de lluvia y la acción de las bacterias, generando flujos de agua contaminada denominados **lixiviados**, que en la mayoría de los casos no son tratados adecuadamente.

Los lixiviados se caracterizan por altas cargas orgánicas demandantes de oxígeno, así como por altos contenidos de sales, amonio, metales pesados, ácidos orgánicos, proteínas y grasas, entre otros compuestos químicos (Ehrig, 1999). Éstos pueden viajar a través del medio poroso hasta alcanzar el nivel freático con velocidades que van a depender de las condiciones hidrogeológicas del medio, de los procesos de degradación biótica y abiótica y del propio diseño que se haya hecho en el depósito o vertedero.

La municipalidad de la ciudad de Granada deposita la basura a cielo abierto sin ningún tipo de tratamiento en el sitio denominado La Joya, que es una depresión natural probablemente una hoya magmática colapsada (Hodgson, 1998); compuesta por materiales volcánicos altamente permeables, que facilitan la infiltración de los lixiviados hacia el acuífero del que se abastece a la ciudad, lo que podría llegar a convertirse en la causa principal de los problemas de salud de la población granadina al consumir agua contaminada con estos lixiviados.



## **1.5 Objetivos**

### **General**

Caracterizar la estela de contaminación generada por el basurero La Joya de la ciudad de Granada.

### **Específicos**

- Caracterizar la hidrogeología de la zona de estudio.
- Determinar las principales sustancias lixiviadas.
- Delimitar la extensión alcanzada por la estela.
- Valorar la presencia de lixiviados en el área de campo de pozos para abastecimiento de agua potable.

## 1.6 Justificación

El crecimiento demográfico no implica únicamente el aumento en la población; sino que también conlleva un incremento en la demanda de recursos naturales: mayor cantidad de agua para uso potable, doméstico, industrial y para riego; mayor cantidad de alimentos (de origen vegetal y animal); mayor desarrollo urbano e industrial; entre otros. Todas estas actividades antropogénicas, generan desechos orgánicos e inorgánicos, los cuales por lo general son depositados en sitios a cielo abierto.

En el pasado, la selección del sitio para el depósito de desechos sólidos estaba basada casi exclusivamente en la conveniencia y accesibilidad al lugar. Como resultado, muchos de los desechos terminaban en áreas originalmente consideradas como inadecuadas para agricultura o construcción; como por ejemplo: minas averiadas, barrancos y humedales (Custodio & Llamas, 2001). La falta de un estudio previo para la selección del lugar, como en el caso de los botaderos y basureros, ha provocado la contaminación tanto de aguas subterráneas como superficiales.

En Estados Unidos (Peterson 1983; en Llamas & Custodio, 2001), reportó la existencia de casi 13,000 rellenos sanitarios, incluyendo cerca de 2,400 botaderos a cielo abierto (generalmente no regulados). En el sur de Ontario, Canadá (Eyless et al. 1992 en Llamas & Custodio, 2001); documentó la localización de 1,183 sitios de disposición de desperdicios, muchos de los cuales estaban localizados en áreas que ahora están grandemente urbanizadas.

La primera preocupación concerniente asociada con los rellenos sanitarios es la producción de lixiviados que pueden contaminar tanto los recursos acuáticos subterráneos como los superficiales; donde las sustancias químicas inorgánicas son normalmente dominantes, en un rango típico por arriba de los 50,000 mg.l<sup>-1</sup>. Los lixiviados también pueden contener concentraciones significativas de ácidos orgánicos y compuestos orgánicos sintéticos, tales como componentes de petróleo, pinturas, productos químicos de la casa, solventes, limpiadores, pegamentos, tintas y plaguicidas (Llamas & Custodio, 2001). Todo esto,

representa un elevado peligro en la salud de los consumidores, debido a la toxicidad de las sustancias lixiviadas.

En una escala global, el agua subterránea representa la fuente mundial más grande e importante de agua potable (Howard, 1997; en Llamas & Custodio, 2001). La magnitud del riesgo que representan los lixiviados de los basureros para el agua subterránea en los países latinoamericanos ha sido abordada como un problema en el proceso de planeación y manejo de los recursos hídricos (Rossin, A. et al, 1998). Existen estudios en Argentina, Colombia, Chile, México y República Dominicana, entre otros países; que abordan la contaminación generada por los residuos sólidos (Cárdenas, 1996; Ehrig, 1999; Castillo, et al., 2000; OPS, 2003; Quadri de la torre et al., 2003). Entre los principales aspectos que se abordan está la contaminación del agua subterránea; en donde se muestran relaciones entre el régimen de precipitación local y la carga de lixiviados que potencialmente pueden generarse y emigrar hacia el acuífero, creando estelas de contaminación que pueden ser aceleradas por el bombeo de pozos circundantes.

En Nicaragua, el agua ha venido sufriendo gran deterioro a causa de la contaminación de origen antropogénico y a su explotación inadecuada; en muchos casos generada por la falta de una planificación integrada del manejo de cuencas y una escasa visión a futuro. Dentro de los principales factores de contaminación antropogénica en el país, la disposición de desechos sólidos es uno de los más importantes; por el efecto que tiene en la población y en el medio ambiente; y a la vez, por las condiciones que este rubro tiene en el país. La falta de recursos financieros que permitan contar con un servicio establecido de recolección de desechos sólidos en todos los municipios del país y al mismo tiempo implementar rellenos sanitarios modernos que prevengan la migración del contaminante y que a la vez permitan que los lixiviados sean colectados y tratados, es la principal limitante.

La realidad del país en éste tema, se manifiesta en la deposición de los desechos sólidos en sitios no controlados (sólo el 13% está registrado ante el MINSA);

incorrectamente seleccionados (en sedimentos permeables, arriba de acuíferos someros, o en proximidad a cuerpos de agua superficial); pobremente contruidos (sin lineamientos y otras técnicas que prevengan fugas); en el desconocimiento de la composición de los desechos sólidos y sin separación de los mismos.

Algunos municipios y comunidades marginadas que se encuentran alejadas de las cabeceras municipales, no cuentan con sistemas recolectores de desechos sólidos; por lo que la basura es: a) quemada en un lugar establecido dentro de la propiedad o donde mejor les parezca dentro de la misma; b) arrojada en barrancos cercanos a la propiedad; c) arrojada a los cauces de los ríos y d) dispuestos en sitios que por la conveniencia y la accesibilidad al mismo, se convierten en un basurero al aire libre.

En Granada, a partir de 1983 se ha venido depositando basura a cielo abierto en el sitio seleccionado por la municipalidad, denominado como el basurero La Joya, que es una depresión natural. A partir de 1997 y después del reacondicionamiento con suelo arcilloso del lugar por la compañía Kokusai Kogio Ltd., la disposición de la basura se hace en forma de celdas; aunque en la actualidad las celdas son de altura variable debido a problemas de disponibilidad de material de relleno y a la limitación en la maquinaria (buldózer) que no permite hacerlo con periodicidad. La acumulación de la basura ha superado el nivel original del terreno formando un domo en el área permitiendo el escurrimiento lateral de los lixiviados por el este y sureste del basurero, dado que el diseño del basurero no cuenta con sistemas de recolección y tratamiento de los líquidos generados, se facilita el drenaje y la acumulación de lixiviados en la parte inferior de la hoya volcánica, lo que podría permitir la incorporación de lixiviados al manto acuífero.

Debido a la gran cantidad de materia orgánica que contiene la basura, el crecimiento bacteriano es favorecido; a su vez, el metabolismo provoca una reducción de los niveles de oxígeno en los lixiviados, este ambiente reducido es responsable de la acidificación progresiva de los lixiviados, lo que facilita el

transporte de los metales pesados hacia el acuífero y de ahí a las zonas de captación.

Se han reportado problemas de contaminación por nitratos ( $> 50 \text{ mg.l}^{-1}$  en 1995) en el pozo perforado PP06 (Quinta Ena 4) de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL, Figura 1). Este se encuentra en la parte baja de la cuenca hidrogeológica, aguas abajo del basurero y varios estudios mencionan que los desechos municipales (o su expresión como lixiviados) podrían estar afectando la calidad del agua del acuífero (Espinosa, 1999; CIRA, 1995; Hecht, 1995). Sin embargo, no hay investigaciones rigurosas que hayan abordado esta problemática.

Este trabajo tiene la finalidad de valorar la presencia de los lixiviados en el medio hidrogeológico (caracterización de la estela de contaminación generada por el basurero) de la zona donde está ubicado el basurero de la ciudad de Granada; determinar la composición de los mismos, así como su dispersión en el acuífero y los posibles impactos producidos en él; en especial en el campo de pozos de abastecimiento público con lo cual se hará un aporte de información necesaria para establecer las bases técnicas apropiadas para la planificación del aprovechamiento actual y futuro del agua subterránea tomando en cuenta las normas regionales de calidad del agua potable.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Descripción área del basurero

La zona aledaña al basurero tiene pendientes casi planas de 1.5 % a 4.0%, en suelos vérticos (VCb2) moderadamente drenados. Estos tipos de suelos tienen un horizonte superficial franco arcilloso de coloración negro a pardo oscuro, se derivan de materiales volcánicos sobreyacidos en las tobas de la formación Las Sierras (INETER, 1971). El uso actual de las tierras aledañas son cultivos de subsistencia consistentes en granos básicos; *Zea mays* (maíz), *Phaseolus vulgaris* (frijoles), *Manihot esculenta* (yuca) y árboles frutales.

El basurero La Joya se encuentra en la cota topográfica 100 msnm ocupando una depresión natural volcánica de unos 21,737.8 m<sup>2</sup> de superficie y profundidad aproximada de 40 m. Se encuentra funcionando desde 1983 y desde esta fecha hasta 1995 se estimó una acumulación de basura aproximada de 249,044.0 m<sup>3</sup> equivalente a 74,713.0 toneladas (PROCÓNSUL, 1996).

Inicialmente se realizó la disposición de la basura a cielo abierto, sin embargo en la actualidad se está realizando coberturas esporádicas con material selecto utilizado en la construcción de carreteras. Con frecuencia se producen incendios probablemente enriquecidos por la combustión de gas metano producido en la descomposición de la basura.

El basurero no recibe todos los desechos generados en la ciudad de Granada. Por información obtenida, se conoce que la recolección de la basura se brinda con una cobertura de 7 zonas atendidas 6 días a la semana. Donde no hay accesibilidad a vehículos recolectores no se brinda el servicio con regularidad. En una entrevista hecha al encargado de recibir los vehículos que llegan al basurero, se logró conocer algunos tipos de desechos que empresas estatales, privadas y particulares llegan a dejar al sitio (Tabla 1).

Tabla 1. Origen y frecuencia de residuos que llegan al basurero La Joya, Granada.

EMPRESA	DESCRIPCION	PERIODICIDAD	OBSERVACION
Chamorro Industrial	Aceite vegetal, cartón, plástico	2 días por semana	
MONISA	Comida de animal	Diario	Vehículo Grande
PETRONIC	Aceite automotriz	Esporádico	Aproximadamente 1 m <sup>3</sup>
REPTINIC (curtiembre)	Desechos de cuero	1 día a la semana	10 a 12 barriles
CONSTRUCCIÓN	Desechos de construcción	Esporádico	
INTUR	Desechos de costa (papel, plástico)	3 días por semana	Camión
ALCALDÍA	Desechos domésticos	Diario	4 vehículos recolectan 75 ton/día

En el estudio realizado por CIRA (1995), se encontró que el 45% de la población de Granada recibe el servicio de recolección de basura y el restante la dispone de forma inadecuada en sitios no autorizados (ilegales), diseminados en los arroyos urbanos; y de éstos sitios su destino final son las costas del Lago Cocibolca.

De la producción total de residuos generados por la ciudadanía granadina el mayor porcentaje está constituido por materia orgánica (Tabla 2); independientemente de la condición social de la población la que fue calificada como: sector social alto, sector social medio, sector social pobre y sector en extrema pobreza (CIRA, 1995).

Los residuos generados por actividades industriales provienen de alimentos, jabonería, papel y tenerías. Los residuos hospitalarios se agrupan junto con los industriales como residuos no domésticos. Todos ellos representan alto riesgo para las aguas subterráneas y superficiales por los lixiviados que generan en el sitio donde se disponen.

Tabla 2. Caracterización de desechos sólidos en la ciudad de Granada (CIRA, 1995).

Fuente	Promedio domiciliar (lb/día)				Doméstica No Doméstica	
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	%	%
Materia Orgánica	949.74	1010.15	1061.91	1184.04	85.7	42.32
Papel y cartón	63.52	62.39	25.24	24.26	3.6	4.18
Plástico	89.71	83.70	62.20	33.80	5.5	0.74
Vidrio	6.84	6.50	6.31	1.03	0.4	2.91
Metales	2.18	2.18	0.94	10.62	0.3	1.55
Otros (tierra)	4.06	5.20	18.28	192.52	4.5	----
Especiales (diversos tipos no domiciliar)						48.42
Producción de basura (kg/día)					34 966.1	13 623.0
Producción de basura (ton/año)					12 762.6	4 972.4
Densidad promedio de la basura (ton/m <sup>3</sup> )					0.30	

Zona A: Sector social alto

Zona B: Sector social medio

Zona C: Sector social pobre

Zona D: Sector social en extrema pobreza

Todo el material depositado en el sitio La Joya está sometido a los procesos de degradación que se llevan a cabo en los rellenos o basureros, estos son útiles para identificar los tipos de análisis que se deben hacer para caracterizar los lixiviados y las condiciones que adquieren las aguas subterráneas cercanas a los basureros (Fetter, 1993; Custodio & Llamas, 1976; Cárdenas, 1996; Kreith, 1994).

## 2.2 Clima

El área de estudio está caracterizada por dos periodos estacionales muy marcados: una estación lluviosa que se inicia en Mayo y finaliza en Octubre y en ésta se presenta del 90% a 95 % de la precipitación medida en el año; y la seca que inicia en Noviembre y finaliza en Abril (Fenzl, 1989).



El clima de la zona de Granada de acuerdo a la clasificación climática de Köppen (Fenzl, 1989) es de tipo tropical de sabana. Sus características principales son altas temperaturas, abundante insolación y vientos predominantes en dirección este - oeste.

Durante la estación lluviosa se presenta un periodo de escasa a nula precipitación conocido como canícula, se manifiesta en las dos últimas semanas de Julio y las dos primeras de Agosto. La temperatura es uniforme todo el año teniendo como promedio mensual 27.6°C (Fenzl, 1989).

### **2.2.1 Datos meteorológicos**

Los datos meteorológicos, nos indican las condiciones atmosféricas presentes en un momento dado y la manera en que ellos influyen en un área de estudio determinada. Por consiguiente, se consideraron los datos meteorológicos de la subcuenca para determinar la cantidad de lixiviados producidos (Anexo 1). Asimismo, se realizó una comparación de los valores de lixiviados estimados en: a) el balance hídrico hecho en el estudio del CIRA/UNAN (“Proyecto Generación de las Bases Científico-Técnicas y Sociales para la Formulación de un Plan de Saneamiento de Granada y su área de Influencia”, 1995) y b) los obtenidos por este trabajo mediante la metodología aplicada por Ehrig (1999).

Una consideración estadística importante para el uso de la metodología del balance hídrico es que los datos no deben ser menores a 15 años de registros meteorológicos, consideración que se tomó en cuenta para hacer las estimaciones de lixiviados en este estudio.

### **2.2.2 Precipitación**

Es el agua que proviene de la atmósfera originada por condensación del vapor de agua ya sea en forma de lluvia o nieve (Custodio & Llamas, 1976). La precipitación se mide por la altura que alcanza una lámina de agua en una superficie horizontal. Las alturas están dadas en milímetros (mm) o décimas de milímetro. En Nicaragua el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) ha uniformado sus medidores de lluvia en 200 cm<sup>2</sup> que equivale a 15.96 cm de diámetro.

Los instrumentos para medir la precipitación (pluviómetros) pueden ser cualquier recipiente abierto en la parte superior; pero estos podrían ser afectados por factores externos como el viento (que haría variar las mediciones de una estación a otra). El pluviómetro estandarizado tiene un colector en su parte interior que, por lo general es un cilindro graduado de alta precisión.

El régimen de precipitaciones en el país, indica que la mayor cantidad se concentra en el mes de Octubre. En la región del Pacífico, donde se ubica el área de estudio, la precipitación anual oscila entre 1 000 y 1 600 mm (INETER, 1995). Para efecto de la estimación de la cantidad de lixiviados producidos en el basurero se trabajó con los datos de la estación meteorológica de Granada (69030).

### **2.2.3 Evaporación**

Es el resultado del proceso físico, por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. En Nicaragua, existen muy pocas estaciones que registran datos de evaporación. Estos datos son generados en estaciones meteorológicas dotadas con tanques tipo A, consistentes en un depósito cilíndrico de chapa galvanizada con diámetro de 1.20 m y 0.254 m de altura; el cual es colocado a 0.15 m del suelo (Custodio & Llamas, 1976). Un problema que presentan los registros de éste parámetro, por lo general, son diferencias en las mediciones; por lo que los datos no siempre son confiables. En Nicaragua la evaporación presenta diferencias marcadas entre la

estación seca y la estación lluviosa, siendo los mayores valores en época seca (Fenzl, 1989).

#### **2.2.4 Vientos**

La dirección de los vientos en Nicaragua, generalmente es en rumbo NE y E-N; con velocidades que varían entre los 2.2 y 5.6 m/s. Los menos frecuentes tienen dirección SE y velocidades entre 2 y 3.2 m/s; como los observados en Granada y Managua (Fenzl, 1989).

Estas direcciones provocan en el área del basurero una dispersión de la contaminación a través del aire hacia la zona del volcán Mombacho, Catarina, Granada y la carretera Granada – Nandaime (malos olores producto de la descomposición del material orgánico, y humo generado por la combustión de basura y de los gases generados en el basurero). Entorno al basurero, existe la dispersión de desechos plásticos que son llevados por el viento a nivel del suelo.

### **2.3 Geología y Geomorfología**

Investigaciones sobre sismicidad han determinado una extensa zona de fallamiento relacionada con la fosa Mesoamericana. Se presenta un deslizamiento de la Placa Cocos debajo de la Placa Caribe con una inclinación desde unos 30° a 40° y en algunas zonas de hasta 60° hacia el NE a una velocidad de 8 cm/año. La mayoría de los fenómenos geológicos están relacionados a estos movimientos, que se expresan como terremotos y vulcanismo, los cuales a su vez originan fallas, fracturas, lineamientos y deformaciones de las rocas de la corteza terrestre (Hodgson, 1998; Denyer et al., 2000).

El reconocimiento de las estructuras geológicas formadas se debe hacer valorando entre otros aspectos las expresiones topográficas presentes en el área de estudio, sin embargo, esto se dificulta por que las estructuras generalmente

están cubiertas. Por lo tanto, hay que recurrir a métodos como los geofísicos, geotécnicos y de perforación; entre otros.

Las estructuras geológicas más importantes que se conocen en Nicaragua se interceptan en la provincia de la costa del Pacífico de Nicaragua (Figura 2), la que está localizada sobre la Placa Tectónica Continental y la Placa Cocos. La provincia más afectada por grandes movimientos sísmicos y las actividades volcánicas es la Provincia de la Depresión (Hodgson, 1998). El conjunto de volcanes se observa a lo largo de esta provincia, desde Costa Rica hasta Guatemala.

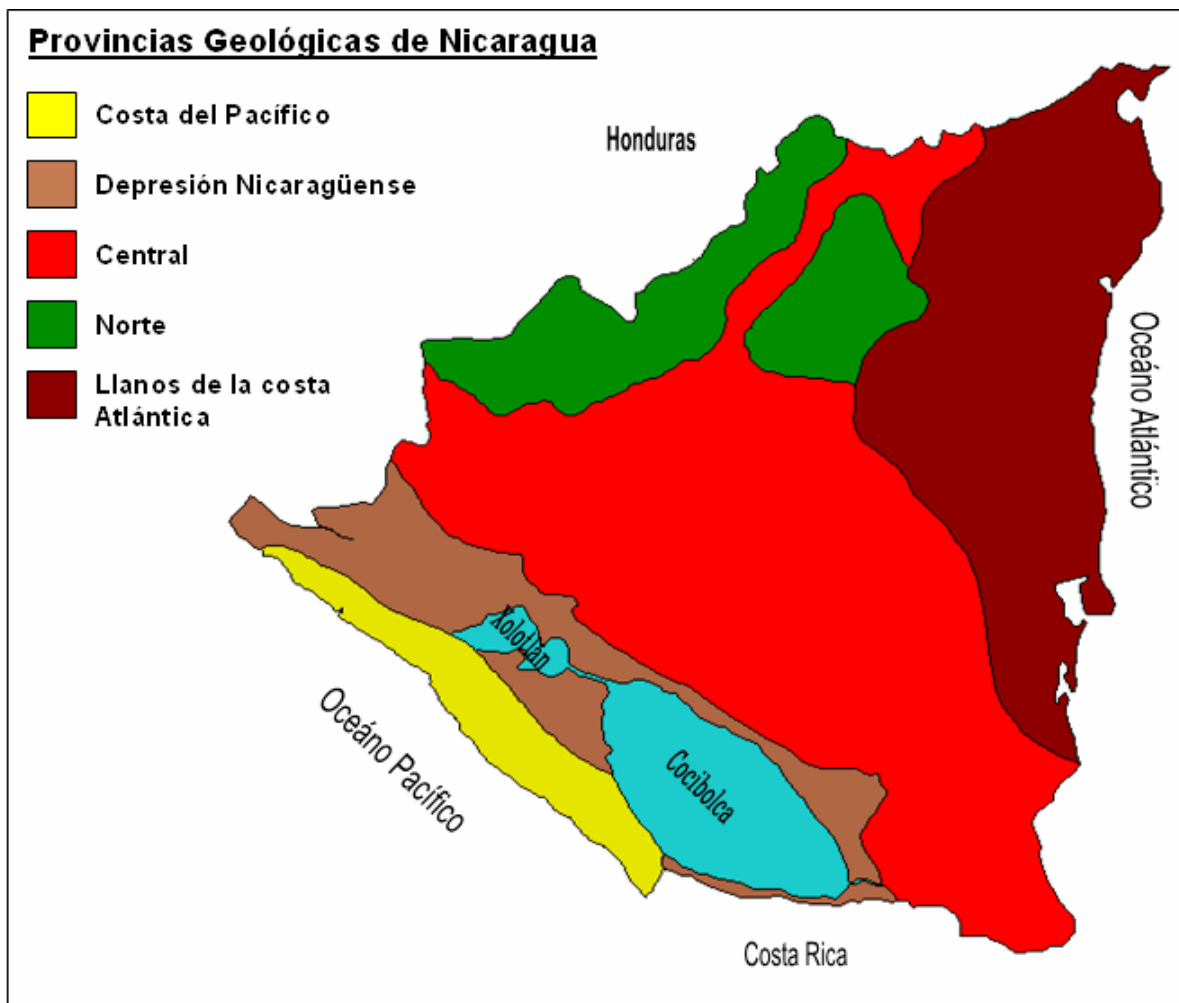


Figura 2. Provincias geológicas Nicaragüenses (Hodgson, V. G. 1998).

### **2.3.1 Relieve y altitud del área**

La Provincia de la Depresión se caracteriza por un relieve suave, de unos 45 km de ancho. Se extiende desde la frontera con Costa Rica (SE) hasta el Golfo de Fonseca (NW). Limita al este con las tierras altas de la región central y al sur y SW llega al pie oriental de la cadena volcánica (Figura 2). Tiene una estructura de graben o fosa tectónica parcialmente cubierta por depósitos aluviales y escombros volcánicos.

Las zonas topográficas más bajas están ocupadas por el Golfo de Fonseca, Lago de Managua y el Lago de Nicaragua (con un nivel de agua en este último de 31 msnm aproximadamente; Fenzl, 1988).

### **2.3.2 Geología Regional**

La Geología de Nicaragua se originó en el Paleozoico y culminó con la intensa actividad volcánica del principio del Cuaternario (Hodgson, 1998). En esta época se dio una diferenciada actividad en todo el país, eventos que han servido para dividir a Nicaragua geológicamente en cinco provincias: Provincia de la Costa del Pacífico, Provincia de la Depresión Nicaragüense, Provincia Central, Provincia del Norte y la Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica (Figura 2).

Su Geomorfología comprende relieve con bajas pendientes onduladas donde se localizan los dos grandes lagos de Nicaragua; también presenta elevados conos volcánicos y relieves circulares de cráteres.

La Depresión tuvo su comienzo durante el Mioceno – Plioceno y se continuó hasta el Cuaternario. Las actividades volcánicas del Cuaternario predominan en la Provincia de la Costa del Pacífico con el desarrollo de la Cordillera de los Maribios y otras estructuras de calderas y cráteres volcánicos.

Predominan las rocas volcánicas y depósitos sedimentarios del Pleistoceno reciente. Las rocas características están comprendidas en la serie piroclástica de la Formación Las Sierras y el Grupo Managua; pero también hay flujos lávicos de

las actividades volcánicas recientes. Todo el conjunto de roca superficial tiene un espesor de unos 900 m. Perforaciones en el graben señalan un espesor de 2,000 m de depósitos piroclásticos y aluvionales (Hodgson, 1998).

Los minerales presentes en la zona están relacionados con los fenómenos volcánicos residuales; entre ellos: azufre, carbonato de calcio, sílice, diatomita y arcilla bentonítica. Abundan los depósitos fragmentarios como arena, lapilli, piedra pómez y basalto escoriáceo, como los encontrados en Granada.

### **2.3.3 Geología local**

La estructura más relevante del área es el Volcán Mombacho, cuya última erupción fue en 1850. Al Sur de la ciudad de Granada se presentan estructuras volcánicas en forma de cráteres conocidas como hoyas volcánicas. Estos tienen el mismo origen que los encontrados en Ticomo y Nejapa (Managua); y son originados por el hundimiento de la base del edificio volcánico debido al retiro o a la disminución magmática (Hodgson, 1998).

La Geología del área de Granada está dominada por rocas cuaternarias del período Plio-Pleistoceno al Holoceno, que tienen su origen en las actividades previas de los volcanes Mombacho y Apoyo. Las rocas están constituidas por pómez, escorias volcánicas, cenizas, lapilli, tobas y abundantes piroclastos.

En la zona circundante al Lago Cocibolca se localizan aluviones intercalados con sedimentos fluvio-volcánicos, que se extienden hasta la planicie de Tisma. Sus espesores no sobrepasan los 10 m. Hacia el Oeste se encuentran los afloramientos de rocas cuaternarias del vulcanismo Apoyo y Mombacho correspondientes a pómez, tobas compactas, cenizas, aglomerados volcánicos, lavas y lapilli.

Este tipo de material es muy apropiado para la acumulación del agua subterránea. La mayoría de las reservas de agua están en este tipo de rocas; sin embargo, también son susceptibles a la contaminación por su alta permeabilidad, debido a

sus características vesiculares, porosidad, esponjosidad (piedras pómez) y cavernosidad.

La secuencia estratigráfica se inicia con las rocas lávicas cuaternarias antiguas del Pleistoceno producto de la actividad más antigua del Mombacho hasta el Cuaternario Reciente (Figura 3). Las más antiguas son las representadas por el Grupo Las Sierras (TQps), que constituyen el basamento relativo con un espesor máximo aproximado de 680 m. Este Grupo aflora en varias áreas de la Depresión Nicaragüense, tales como las observadas en la costa del Lago de Nicaragua, sur de las Islas Zapatera y Ometepe y del Archipiélago de Solentiname. También se encuentra formando la meseta de Carazo y subyace generalmente a los depósitos aluviales y volcánicos recientes de la Depresión Nicaragüense (Fenzl, 1989).

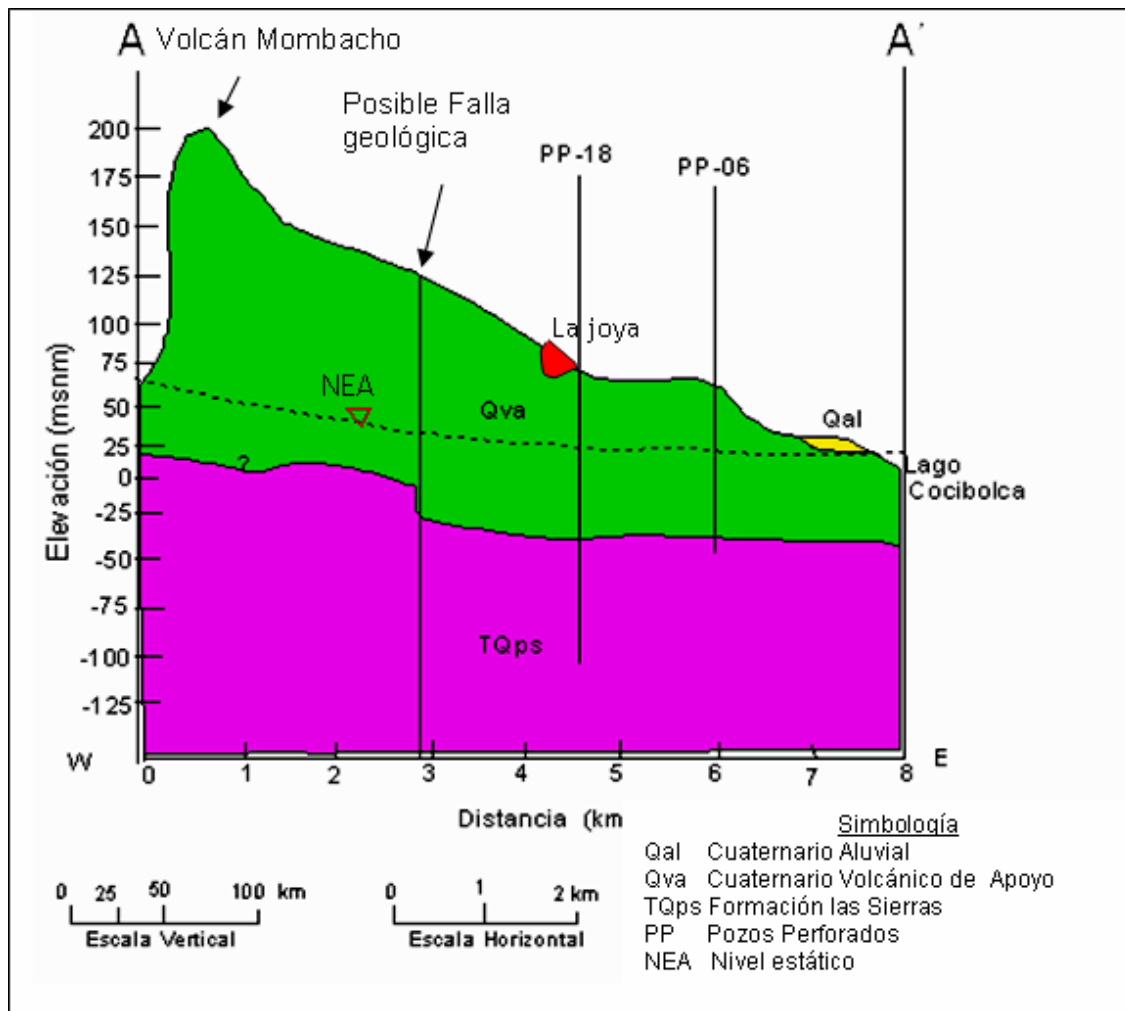


Figura 3. Secuencia litológica del área de la subcuenca hidrogeológica de Granada (SGN, 1973 en Espinoza, M. 1999).

**Formación Las Sierras** (TQps). De edad Plioceno – Pleistoceno, puede llegar alcanzar los 600 m de espesor en las partes más altas y hasta unos 250 m en las partes bajas acercándose al Río Tipitapa (Montgomeri & Chan, 1981). Está compuesta por piroclastos sueltos y de mediana compactación.

La unidad superior de ésta Formación se compone de aglomerados consolidados de unos 80 m, de color pardo, gris amarillento muy descompuesta. La unidad intermedia está compuesta de tobas finas consolidadas y de materiales piroclásticos color pardo claro con un espesor de hasta 90 m; y la parte más inferior está compuesta por aglomerados finos compactados, cenizas volcánicas y tobas gris verdosas. Su espesor es de aproximadamente 100 m.

La parte superior del Grupo Las Sierras, limita con un nivel espeso de unas decenas de metros de flujo aglomerático, con clastos sub-redondeados de basalto (toba lítica) provenientes de la emisión pleistocénica del Complejo Masaya antes de la formación de la caldera de Apoyo.

Sobreyaciendo a este Grupo, se encuentra el **Grupo Cuaternario Volcánico**, denominación dada al vulcanismo ocurrido durante el Pleistoceno Superior-Holoceno, con emisiones de lavas, cenizas, lapilli y pómez. Este Grupo se ha dividido en cuatro miembros: **Grupo Volcánico de Apoyo, Cuaternario Volcánico Mombacho, Cuaternario Aluvial y Cuaternario Residual**.

El **Cuaternario Volcánico de Apoyo** (Qva) está formado por emisiones pumíticas de la caldera de Apoyo (Figura 4). Su génesis proviene de un colapso después de la gran erupción de pómez dacíticos. Son de coloración blanco grisáceo, con cristales verdes de hornblenda y de andesita, se encuentran cubriendo gran parte del área sur de Granada. Su edad estimada es de aproximadamente 23 000 años cuyo volumen es aproximadamente 11 km<sup>3</sup> (Sussman, 1985).

**Cuaternario Volcánico de Mombacho** (Qvl). Se presenta como un estrato-volcán con altura en su pico más alto de 1344 msnm, con un cono truncado. En sus flancos se presentan evidencias de secuencias de avalanchas que descendieron por sus laderas abruptas llegando a formar abanicos aluviales de



fragmentos rocosos. Se presume que estas avalanchas llegaron hasta la costa del lago Cocibolca dando origen a la serie de islas conocidas como las “Isletas de Granada”.

El **Cuaternario Volcánico Aluvial** (Qal) está formado por conglomerados de rocas ígneas, arcillas y areniscas depositados en ambiente aluvial. Presenta varias tonalidades de color amarillento. Depósitos aluviales arenosos se encuentran cubriendo los materiales pumíticos en las costas en dirección Norte. Esta Formación no sobrepasa los 10 m (Electroconsul, 1982 en Espinoza, 1999).

La tectónica del área de estudio es originada por la subducción de la placa Cocos y Caribe y el vulcanismo que afecta la región del pacífico, está formada por conos volcánicos, calderas y otras estructuras; como fallas y fracturas que se asocian a los cráteres como la Joya (Figura 4), la que es atravesada de norte a sur y de oeste a este por fallas que podrían ocasionar un flujo preferencial a través de ellas hacia la zona de descarga en el lago Cocibolca (Ferrey, 1971, 1999 & INETER, 1998).

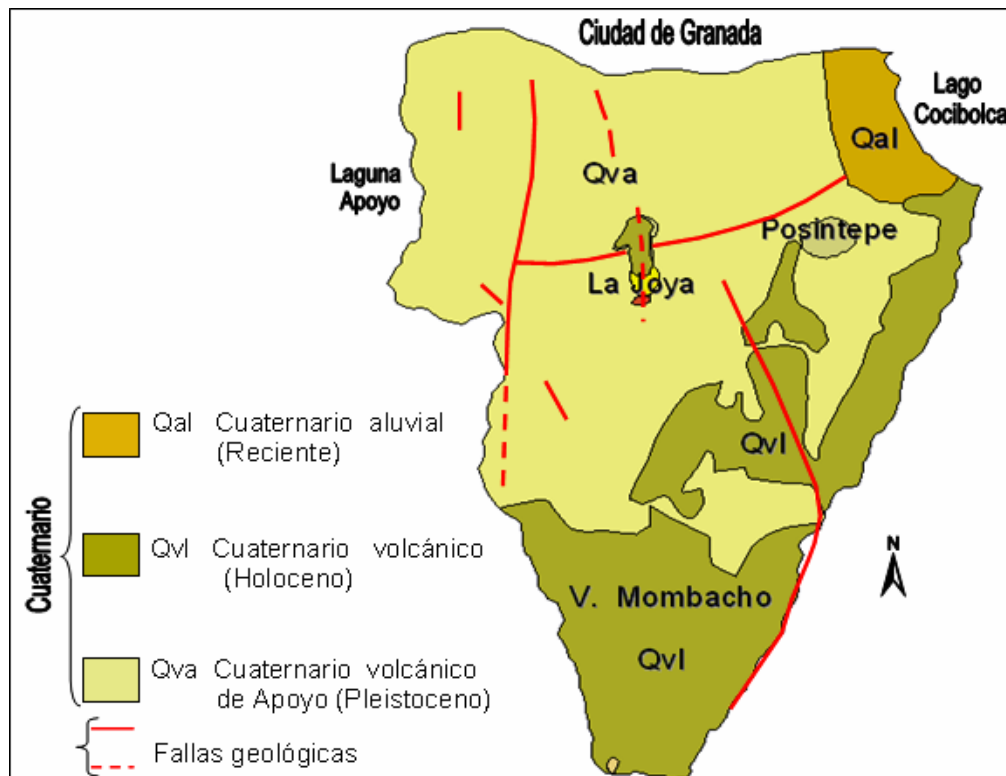


Figura 4. Mapa geológico y estructural del área (modificado de SGN, 1973 en Espinoza, 1999 & Ferrey y Williams en IGN, 1971).

## 2.4 Suelos

A lo que llamamos suelo son los fragmentos que se originan de las rocas a causa de la meteorización, la erosión y los residuos humanos. Los elementos minerales principales de las rocas son los granos de cuarzo, arcilla, óxidos metálicos, carbonatos y diversas sales. Los residuos humanos son el humus (de coloración oscura), formado por materia orgánica en descomposición, hidrocarburos, ácidos orgánicos y sales metálicas (Hodgson, 1998).

Los suelos bien desarrollados presentan una estratificación bien definida, llamada **horizontes**. Cada suelo tiene su perfil característico y este se compone de un horizonte superior, un medio y un inferior (Hodgson, 1998).

El horizonte superior es conocido como **horizonte "A"**. Puede llegar a tener hasta 60 cm de profundidad y es muy común la coloración oscura debido a la presencia de humus. Su composición incluye partículas finas y arcilla. El agua que se infiltra en este horizonte arrastra de este hacia los niveles inferiores sales solubles y coloides.

El **horizonte medio "B"** es de coloración más clara (pardo rojizo a amarillento) por la ausencia de humus y por la presencia de óxidos de hierro; contiene alúmina coloidal que le confiere un carácter plástico y menos poroso que el horizonte superior. En climas secos y con abundante material calcáreo se forman concreciones distribuidas en niveles definidos. Este horizonte también es conocido como aluvial. Los horizontes A y B forman el suelo propiamente dicho, su espesor es más amplio en climas calidos como los que se presentan en Nicaragua.

**El Horizonte "C"** es de mayor profundidad y constituye la zona de transición a la roca sólida. Está formada por cantos sueltos en una matriz de arcilla y arena, su espesor es de unos pocos metros. Este horizonte se desarrolla mejor en los climas cálidos y húmedos recibiendo el nombre de zona iluvial.

### 2.4.1 Capacidad de infiltración

La tasa de infiltración es la velocidad con la que el agua penetra en el suelo (Custodio & Llamas, 1976). Usualmente es medida por la profundidad en mm o cm por hora. Esto expresa cuanta cantidad de agua puede penetrar en el suelo en una hora. Por ejemplo, una tasa de infiltración de 50 mm/h significa que una capa de agua de 50 mm sobre la superficie del suelo le toma el tiempo de una hora para infiltrarse completamente.

La **tasa de infiltración inicial** corresponde a los primeros valores de infiltración obtenidos cuando el suelo esta completamente seco. A medida que el agua va sustituyendo el aire que se encuentra en los poros del suelo, la velocidad de infiltración va a disminuir hasta estabilizar su velocidad. Cuando ocurre esto hemos encontrado la **tasa básica de infiltración**, valor importante para estimar la recarga al acuífero.

La tasa de infiltración está en dependencia de las características del suelo tales como textura (tamaño de partículas) y estructura (arreglo de las partículas). Estas características se tomaron en consideración para ubicar las pruebas de infiltración auxiliados con los diferentes tipos de suelos catalogados en el mapa de uso de suelos de la zona de Granada (INETER, 1971).

La Tabla 3 presenta valores de infiltración básica en dependencia del tipo de suelo.

Tabla 3. Infiltración básica en suelos  
(CIRA – CARA, 2003).

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Infiltración básica (mm/h)</b>
Arena	Más de 30
Limo arenoso	20 – 30
Limo	10 – 20
Limo arcilloso	5 – 10
Arcilla	1 – 5

Existen varios métodos para medir la tasa de infiltración; entre los más usados están los infiltrómetros de anillo simple o dobles.

Durante la infiltración se dan tres tipos de flujos: **no saturado, saturado y encharcamiento**. El primero correspondería a la tasa de flujo inicial, el segundo a la tasa de flujo estacionario que ocurre cuando el agua se moviliza dentro del suelo a una tasa de infiltración determinada por la textura y estructura del suelo; y finalmente el encharcamiento, cuando el suelo está totalmente saturado y no puede conducir más agua a través de los poros.

## 2.5 Hidrología

### 2.5.1 Descripción morfológica de la cuenca

El área de estudio tiene elevaciones desde los 30 m sobre las costas del Lago Cocibolca a la altura de Granada, hasta los 1344 m en la cima del volcán Mombacho. Predominan suelos franco-limo-arenosos bastante superficiales, con pendientes ligeras en las zonas cercanas a la ciudad de Granada, hasta 75% en las laderas del Volcán Mombacho.

Los rasgos geográficos principales de la zona son: el Volcán Mombacho y el pequeño domo dacítico de unos 250 msnm llamado Posintepe; seguidos de las estructuras volcánicas alineadas conocidas como hoyas volcánicas y el Lago de Nicaragua o Cocibolca.

El uso actual de la tierra es predominantemente agrícola, principalmente para satisfacer las demandas de autoconsumo de la población rural y algunas fincas ganaderas que poseen captaciones subterráneas a través de pozos para el suministro de agua.

El régimen hidrológico está caracterizado por dos estaciones climáticas bien diferenciadas, una lluviosa que generalmente se inicia en mayo y finaliza en octubre, la otra muy seca que se extiende de noviembre hasta abril. Esta situación ocasiona escasez de agua superficial en la región durante el período

seco, en contraste a la gran escorrentía superficial de los meses lluviosos, frecuentemente con gran turbidez por el arrastre de sedimentos.

Tanto el agua subterránea como la escorrentía superficial del área en estudio descargan en el Lago Cocibolca que tiene un área aproximada de 8 000 km<sup>2</sup> con una profundidad promedio de 13 m y una máxima de 70 m (CIRA, 1996).

Producto de la génesis de las laderas del volcán Mombacho se presenta numerosas cárcavas que comienzan en la parte media del volcán, las que se profundizan en cauces a medida que se aproximan a las zona más bajas hasta llegar a desaparecer antes de llegar a las orillas del lago, provocado por las casi nulas pendientes del terreno que se presentan en una franja de unos 900 m a lo largo de la costa del lago, con terrenos principalmente arenosos (M1fa), favorables para la infiltración de la mayor parte de la escorrentía que fluye por cauces y arroyos.

De la parte media a la baja de la subcuenca existen asentamientos humanos distribuidos en varios barrios conocidos como: Posintepe ubicado en los alrededores del domo del mismo nombre; Comarca El Pochote y el rastro municipal a la altura del pozo perforado 17 de ENACAL; seguido de los asentamientos El Madroño y El Pantanal. En todos ellos no se cuenta con sistema de alcantarillado sanitario por lo que vierten en los arroyos sus desechos residuales líquidos y basura.

### **2.5.2 Características hidráulicas**

Existe un gradiente hidráulico superficial de dirección Oeste – Este (Laguna de Apoyo – Lago de Nicaragua) y uno de dirección Noreste, con flujo que baja por las laderas del Volcán Mombacho. Presenta un caudal superficial efímero debido a que los cauces y arroyos solo transportan agua en tiempo de precipitaciones fuertes en la zona. Esta dinámica obedece a que los suelos son altamente permeables y de alta infiltración que permite que gran porcentaje del agua

precipitada sea incorporada al manto acuífero (88%) y otra parte sea drenada debido a la escasa vegetación presente en la zona.

En el acuífero de Granada existen tres zonas definidas en donde se presentan tasas de infiltración que van desde los 10 mm/h hasta los 90 mm/h (Espinoza, M., 1999), siendo una de ellas el área donde se ubica el basurero cuyos datos indican que es donde se dan las mayores recargas del acuífero.

## **2.6 Hidrogeología**

Los acuíferos más importantes del país se localizan en las formaciones cuaternarias de la planicie de León – Chinandega, meseta de Carazo y la depresión Nicaragüense, compuesta por la cordillera volcánica del Pacífico que es donde se presentan elevadas tasas de recarga, originadas en su mayor parte por la infiltración de las aguas de lluvia. Las áreas de descarga se encuentran a lo largo de la planicie costera de los lagos Cocibolca y Xolotlán y en las costas del Océano Pacífico.

Los acuíferos aluvionales piroclásticos de la depresión Nicaragüense presentan en la mayoría de los casos altas transmisividades, variando desde los 4 m<sup>2</sup>/día a 13,900 m<sup>2</sup>/día. Las capacidades específicas varían entre 0.40 y 400 m<sup>3</sup>/h/m y los valores del coeficiente de almacenamiento van desde  $2,9 \times 10^{-6}$  hasta 0.35 que al igual que las transmisividades, los valores más altos se presentan en los aluviones y piroclastos cuaternarios (Losilla et. al, 2001). Las transmisividades se pueden clasificar de alta a muy baja; alta si es mayor a 1 000 m<sup>2</sup>/día, media entre 500 y 1 000 m<sup>2</sup>/día, y muy baja o nula si es menor a 100 m<sup>2</sup>/día (Fenzl, 1988).

### 2.6.1 Unidades hidrogeológicas

El acuífero se encuentra en rocas volcánicas del **Cuaternario reciente (Qva)** con propiedades hidráulicas muy importantes. Se presentan altos valores de permeabilidad muy aptas para la recarga del acuífero.

**Formación Las Sierras (TQps).** De edad plio-pleistocénica, de origen volcánico, constituida por rocas piroclásticas y flujos andesíticos con un espesor aproximado de 600 m. Representa el basamento impermeable.

Sobreyaciendo a Las Sierras se encuentra el **Cuaternario volcánico** con sus cuatro miembros: Grupo Apoyo (**Qva**), Mombacho (**Qvl**), aluvial (**Qal**) y el residual (**Qr**).

### 2.6.2 Recarga del acuífero

Las mayores tasas de recarga se encuentran en las áreas de la cordillera volcánica del Pacífico, ésta proviene principalmente de la infiltración del agua de lluvia y en cantidades menores del exceso de las aguas de riego (recarga de retorno).

Según Fenzl, (1988) el 23% de las precipitaciones en la región se infiltran y constituyen la recarga principal de los acuíferos. La ecuación encontrada para la vertiente del Pacífico propone lo siguiente:

$$P (100\%) = ETR (53\%) + EST (24\%) + I (23\%)$$

En donde:

P	: Precipitación
ETR	: Evapotranspiración real
EST	: Escurrimiento total
I	: Infiltración

### 2.6.3 Dirección del flujo subterráneo

Los flujos subterráneos bajan desde lo alto de la parte norte del Volcán Mombacho y del borde de la Laguna de Apoyo hasta llegar a converger y tomar rumbo noreste hacia el Lago (Espinoza, 1999).

### 2.6.4 Parámetros hidráulicos

La transmisividad, conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento, son parámetros que permiten definir las características del medio hidrogeológico y en mucho de los casos predecir su comportamiento al ser influenciado por actividades antropogénicas. La mejor forma de obtener la cuantificación de los parámetros hidráulicos es mediante pruebas de bombeo.

La **transmisividad (T)**: termino introducido por Theis y definido como el flujo (Q) de agua subterránea que pasa a través de una sección vertical de acuífero de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado del medio hidrogeológico bajo gradiente hidráulico unitario, a una temperatura fija determinada. Sus magnitudes son  $\text{m}^2/\text{día}$  (Custodio & Llamas, 1976). En términos generales es el producto de la permeabilidad (K) y el espesor (b) del acuífero ( $K * b$ ).

Los valores de transmisividad están presentados y resumidos en la Tabla 4. Los valores superiores a  $1000 \text{ m}^2/\text{día}$  son consideradas como transmisividades altas, entre  $1000$  y  $500 \text{ m}^2/\text{día}$  como media, entre  $500$  y  $100 \text{ m}^2/\text{día}$  es considerada baja, y muy baja o nula para valores menores a  $100 \text{ m}^2/\text{día}$  (Custodio & Llamas, 2001). Los valores encontrados en el campo de pozos del Escudo, corresponden a altas transmisividades indicando que el agua tiene una movilidad rápida y eficiente en el medio hidrogeológico de esta área. Igual comportamiento se observa en los pozos Quinta Ena I y III del campo de pozos de Quinta Ena. Por dicho campo de pozos se presume fluya la contaminación generada por los lixiviados del basurero. Puede producirse por tanto, que si se da una explotación intensiva de estos pozos, los conos de influencia generados por ambos pozos y pozos aledaños provocaría



un gradiente hidráulico que haría más rápida la llegada de los contaminantes (Figura 14).

Tabla 4. Transmisividades medidas en los pozos de ENACAL Granada (Espinoza, 1999).

Código	Pozo	Fecha	Q (m <sup>3</sup> /s)	T (m <sup>2</sup> /dia)
PP-04	Quinta Ena I	05-03-73	3.67	2208.00
PP-05	Quinta Ena II	20-10-73	3.79	688.00
PP-03	Quinta Ena III	06-07-82	4.34	1726.00
PP-06	Quinta Ena IV	05-06-90	2.69	845.00
PP-17	El Escudo I	08-06-90	4.54	2085.00
PP-18	El Escudo II	20-02-93	5.03	2085.00

PP: Pozo perforado

**Coeficiente de almacenamiento (S):** es un parámetro adimensional que corresponde al volumen de agua liberado por una columna del acuífero de altura igual al espesor del mismo y de sección unitaria. Para los acuíferos libres, **S** es conocido como rendimiento específico y coincide con la porosidad eficaz, los valores oscilan entre 0.01 y 0.45, siendo lo más frecuente de 0.1 a 0.3 (Custodio & Llamas, 1976).

**Características de pozos:** En el área de estudio se contabilizan 28 pozos perforados (PP) y 11 pozos excavados (PE), destinados para uso potable principalmente y algunos para uso pecuario. La mayoría carece de datos técnicos. En el Anexo 2 se muestra la lista de pozos en los que se midieron parámetros de campo y se tomaron muestras.

Las profundidades varían desde los 3 m en los pozos excavados cercanos a la costa del lago hasta los 152 m en pozos perforados, sin embargo los pozos que están en la parte alta cercanos al borde este de la Laguna de Apoyo (PP-23, sistema penitenciario) tienen mayor profundidad.

### **2.6.5 Explotación del agua subterránea**

El ente encargado del abastecimiento del agua potable a la población de Granada es ENACAL, quien cuenta con dos campos de pozos conocidos como Quinta Ena y El Escudo. Quinta Ena tiene cuatro pozos en total, uno de los cuales, el PP-06 se cerró por problemas de nitratos. Dos pozos perforados en el Escudo actualmente están en operación. En ambos campos de pozos se bombea un promedio de 22 horas en verano y 18 en invierno.

En 1999 se estimó una extracción total aproximada de 10.97 mmca, de los cuales 7.84 mmca son de uso potable, 2.35 mmca de uso agroindustrial y 0.78 de otros usos. La piezometría comienza con la zona de descarga en el Lago Cocibolca aproximadamente a 30.4 msnm que correspondería al nivel 0 sobre la superficie del terreno, 89 m en el pozo PP-25 (La Chanchera) ubicado a unos 200 m al suroeste del basurero y más de 100 m en el sector del sistema penitenciario de Granada (PP-23) cercano a la Laguna de Apoyo (Anexo 2).

## **2.7 Geofísica**

### **2.7.1 Exploración geofísica aplicada a estudios hidrogeológicos**

Los métodos geofísicos se basan en la medición de propiedades físicas específicas de los materiales que conforman el subsuelo, tales como la resistividad eléctrica, conductividad eléctrica, velocidad de propagación del sonido, campo magnético, campo gravitacional, entre otras. Las herramientas de mayor uso por su eficacia en la exploración de aguas subterráneas, tanto someras como profundas son los métodos eléctricos y electromagnéticos, entre los primeros tenemos a los SEV y Tomografía eléctrica (UGR, 2005).

La resistividad ( $\rho$ ) de un medio, es la propiedad física que determina la capacidad de este medio para dejar pasar la corriente eléctrica. La resistividad es la resistencia ( $R$ ) de un cilindro de sección y longitud unitaria al paso de la corriente

eléctrica. Las unidades son ohm metro (ohm-m). La conductividad ( $\sigma$ ) es el inverso de la resistividad y se expresa en microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Los métodos eléctricos aplicados en Hidrogeología utilizan la resistividad específica de los diferentes terrenos. Las mediciones se hacen sobre la superficie del suelo y los resultados obtenidos se representan gráficamente en perfiles. Los suelos generalmente poseen resistividades elevadas al estar secos pero cuando están saturados de agua se vuelven menos resistivos, esto se debe a la presencia de las sales disueltas que acompañan al agua y se comportan como un conductor. Usualmente en el agua de mar los valores de resistividad oscilan alrededor de 0.03 Ohm-m y 3000 Ohm-m en agua ultrapura obtenida por destilación del agua (Custodio & Llamas, 2001).

La prospección eléctrica en corriente continua es una técnica basada en un dispositivo tetraelectródico que inyecta corriente en el terreno y mide la diferencia de potencial que se genera. Los cambios de resistividad calculados permiten modelar la estructura del subsuelo. La aplicación de metodologías como el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) permite obtener imágenes profundas unidimensionales del terreno y el método tomografía eléctrica proporciona perfiles bidimensionales y tridimensionales. A éste último método se le conoce como Sondeos Eléctricos Verticales Continuos, SEVC (UGR, 2005).

Las técnicas geofísicas superficiales son utilizadas para obtener información de las propiedades del subsuelo relacionados con el almacenamiento, movimiento y calidad de las aguas subterráneas. En la actualidad se están empleando para definir la presencia y el impacto potencial de materiales y sustancias contaminantes en el subsuelo, en algunos casos generadas por vertederos, aunque también se están empleando para identificar la presencia de infraestructuras enterradas, como tuberías, cables, tanques, bidones, etc., que deben ser considerados al momento de realizar una perforación (Patzelt et al, 2005).

### **2.7.2 Fuentes de ruido**

Los métodos geofísicos presentan algunas limitaciones, la principal es que debe existir un contraste importante de las propiedades físicas entre las unidades litológicas de interés, otra es la profundidad de penetración y la resolución del método. Por lo general, a mayor profundidad de penetración se puede tener menor resolución o detalle. En algunos casos la presencia de ruidos externos puede imposibilitar la interpretación de los datos, principalmente por objetos conductores como mallas o estructuras metálicas con buen contacto galvánico localizadas cerca de los perfiles de medición (Custodio & Llamas, 2001).

## **2.8 Caracterización Hidrogeoquímica**

### **2.8.1 Parámetros físico – químicos en lixiviados de basureros**

La caracterización física y química está sujeta a los procesos de reacción bioquímica aeróbicos y anaeróbicos que tienen lugar en los basureros y por las condiciones ambientales. Los cambios en la estructura y composición del relleno, tales como la existencia de acumulación de humedad influyen en estos procesos.

La carga orgánica originada por los procesos químicos de óxido-reducción que se llevan a cabo en los basureros tiene mucha importancia para calcular los lixiviados. Los parámetros más importantes para ello son la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

Se determinaron concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno durante la época seca en los dos minipiezómetros instalados en el basurero. En época lluviosa, además de éstos parámetros, se analizaron muestras en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga, para medir el contenido orgánico en el basurero y de las aguas subterráneas de la zona de descarga, ya que ambos parámetros nos ayudan a evaluar las aguas naturales, aguas de desecho municipales e industriales o aguas sometidas a la contaminación orgánica.

La caracterización hidroquímica de los lixiviados se realizó con los principales iones que pueden llevarnos a valorar la contaminación; STD, cloruros, sulfatos, sulfuro,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ . El análisis de otros iones se vio limitado por la metodología empleada para análisis de aguas naturales.

## 2.8.2 Composición físico - química del agua subterránea

### 2.8.2.1 Características físicas del agua subterránea

➤ **pH:** Es el logaritmo negativo de la concentración de los iones hidrógenos ( $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ ). El pH de una solución es una medida de su acidez o más exactamente, una medida de las concentraciones de iones  $[\text{H}^+]$  en la solución. Juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas tales como el equilibrio de carbonatos, procesos redox, solubilidad de metales pesados entre otros (Custodio & Llamas, 1976).

➤ **Conductividad eléctrica:** La conductividad es la capacidad del agua para conducir electricidad y la resistividad eléctrica se define analógicamente como el inverso de la conductividad. La conductividad se incrementa con el aumento en las concentraciones iónicas en solución; sin embargo, el aumento tiene cierto límite que es la máxima capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. Las unidades son microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) para la conductividad; y para la resistividad Ohmio-m ( $\Omega\text{-m}$ ).

La variación de temperatura modifica notablemente la conductividad, para disoluciones diluidas se estima que el aumento de temperatura en  $1^\circ \text{C}$  se traduce en un aumento aproximado del 2% en la conductividad (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Temperatura:** Es el potencial calorífico en grados Celsius de un medio o cuerpo. En las aguas subterráneas este parámetro es muy poco variable y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, algunos incrementos son producto de la actividad geotérmica.

➤ **Oxígeno disuelto:** Es incorporado en el agua por medio de la disolución del aire al momento de la lluvia y por gases contenidos en la zona no saturada. Su presencia es causante de un medio oxidante importante en la solubilización o insolubilización de iones en el agua con capacidad de cambiar sus valencias y controlar la actividad de los microorganismos en el subsuelo.

Genera un medio conocido como aeróbico que es consumido si existen en su presencia sustancias oxidables como la materia orgánica,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , etc. Esto se da en presencia de actividad biológica. En la mayoría de las aguas subterráneas las concentraciones oscilan entre 0 y 5  $\text{mg.l}^{-1}$ ; aunque son frecuentes las concentraciones inferiores a 2  $\text{mg.l}^{-1}$ .

La medición puede ser electrométricamente con suficiente precisión siempre y cuando se tengan en cuenta todas las recomendaciones necesarias para su medición (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Reacciones Redox:** Los sistemas redox son los que cambian sus estados de valencia al reaccionar, oxidándose unas veces y reduciéndose otras. Estas reacciones están regidas por las condiciones de pH, presión, temperatura, etc. Es medido por el potencial redox ( $E_H$ ) que mide la estabilidad de un ión en un nivel de oxidación determinado y viene dado por la ecuación de Nernst.

#### 2.8.2.2 Características químicas del agua subterránea

➤ **Dureza:** Mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones. En la actualidad se le identifica con el contenido en iones alcalinotérreos ( $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  principalmente), con las mismas unidades que la alcalinidad. La dureza de las aguas subterráneas varía entre 10 y 300  $\text{mg.l}^{-1}$  de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  pudiendo llegar a 1000  $\text{mg.l}^{-1}$  o más. Las aguas duras (por encima de 200  $\text{mg.l}^{-1}$ ) son por lo general incrustantes en tanto que las blandas (con menos de 50  $\text{mg.l}^{-1}$ ) suelen ser agresivas (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Alcalinidad:** Se le conoce como la capacidad de un agua para neutralizar ácidos, usualmente es expresado como  $\text{mg.l}^{-1}$  de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  o  $\text{meq.l}^{-1}$ . En la mayoría de las aguas naturales la alcalinidad está producida por los iones carbonato y bicarbonato, los valores están entre  $100 \text{ mg.l}^{-1}$  y  $300 \text{ mg.l}^{-1}$  a veces entre 50 y  $500 \text{ mg.l}^{-1}$  de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , excepcionalmente hasta  $1000 \text{ mg.l}^{-1}$ .

➤ **Demanda química de oxígeno (DQO):** Es la capacidad del agua para consumir oxidantes en procesos químicos, mide el contenido en materiales orgánicos oxidables y otras sustancias que consumen oxígeno como el hierro (II), manganeso (II), amonio, etc. Es un dato semicuantitativo con unidades  $\text{mg.l}^{-1}$  de  $\text{O}_2$ .

En aguas subterráneas no contaminadas los valores oscilan entre 1 y  $5 \text{ mg.l}^{-1}$  de  $\text{O}_2$ . Valores superiores a  $10 \text{ mg.l}^{-1}$  puede ser un claro indicio de contaminación. Valores elevados pueden explicar los malos sabores en el agua de consumo humano (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** Es una medida de la cantidad de oxígeno necesario para eliminar la materia orgánica contenida en un agua mediante los procesos biológicos aeróbicos referido a 5 días. Es una de las medidas de la contaminación en aguas superficiales y aguas subterráneas por lo general con valores menores a  $1 \text{ mg.l}^{-1}$  de  $\text{O}_2$ . Valores altos indican contaminación (Custodio & Llamas, 1976).

La química del agua subterránea está determinada por los tipos y cantidad de sustancias disueltas. Su conocimiento y distribución espacial es importante ya que con ello se puede orientar el tipo de uso que se le puede dar. Generalmente este conocimiento se busca para valorar la potabilidad del agua, usos en la agricultura e industria, entre otros. En Anexo 2 se presentan los valores guías establecidos en la norma regional para agua potable.

La precipitación incorpora diferentes sustancias contenidas en el aire las que se incrementan progresivamente al ponerse en contacto con el suelo y subsuelo respectivamente. Por esta razón es importante tener precaución con las

actividades que se efectúan en las zonas de recarga ya que pueden llegar a alterar los constituyentes que son incorporados de forma natural y que se presentan en forma iónica, los cuales son consideradas como concentraciones normales (Custodio & Llamas, 1976).

La composición iónica del agua subterránea está compuesta por los aniones y los cationes. Los constituyentes aniónicos principales son los bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) como el ión dominante, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ); y los cationes principales son el calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ). Los aniones están totalmente ionizados exceptuando al sílice que se encuentra en forma de  $\text{SiO}_4\text{H}_4$  (Custodio & Llamas, 2001).

Entre los iones menores presentes en el agua subterránea están: nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), hierro ( $\text{Fe}^{+2}$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), fluoruros ( $\text{F}^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y estroncio ( $\text{Sr}^{+2}$ ). Suelen estar en concentraciones entre 0.1 y 10  $\text{mg.l}^{-1}$  y en concentraciones mucho menores (0.0001 y 0.1  $\text{mg.l}^{-1}$ ) el  $\text{Br}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{BO}_3\text{H}^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{+3}$ , etc. Los iones metálicos algunas veces están en cantidades cuantificables; pero en general se presentan como elementos trazas medibles con técnicas especiales (Custodio & Llamas, 2001).



#### 2.8.2.2.1 Características químicas de los iones disueltos en el agua subterránea

##### 2.8.2.2.1.1 Aniones

➤ **Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ):** Se encuentran formando sales muy solubles asociados al ión sodio pero no quiere decir que ambos estén en iguales proporciones; es estable y difícilmente precipitable, no se oxida ni se reduce en las aguas naturales. Las concentraciones del ión cloruro en aguas naturales se encuentra entre 10 y 250  $\text{mg.l}^{-1}$ ; una concentración de 300  $\text{mg.l}^{-1}$  confiere sabor salado al agua aunque se pueden presentar valores superiores a estos entre 18000 y 22000  $\text{mg.l}^{-1}$  como los medidos en agua de mar (Custodio & Llamas, 2001).

En ciertos casos los cloruros se originan de la disolución de terrenos de origen marino, también las aguas fósiles pueden aportar cantidades importantes, las rocas evaporíticas y ciertos minerales de origen ígneo o metamórficas pueden incorporar cantidades mínimas y muy raras veces los gases y líquidos asociados a las emanaciones volcánicas. En cambio, las actividades antropogénicas son la causa principal de los aportes las que son llevadas con los vertidos residuales domésticos e industriales (Custodio & Llamas, 1976).

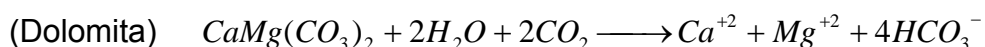
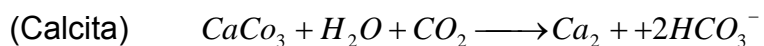
➤ **Sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ):** El origen principal es la disolución del yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, también puede proceder de terrenos formados en condiciones de gran aridez o de un ambiente marino, oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. Otra importante proporción proviene de actividades industriales y agrícolas.

En aguas dulces la concentración normal de  $\text{SO}_4^{-2}$  varía entre 2 y 150  $\text{mg.l}^{-1}$ . El ión sulfato puede estar afectado por los procesos de reducción especialmente en presencia de bacterias y de materia orgánica (Custodio & Llamas, 2001). En ambientes reductores con pH menores de 7, la forma reducida estable es el  $\text{H}_2\text{S}$ ; mientras que en soluciones alcalinas predomina el ión  $\text{HS}^-$ .

Puede precipitar como  $\text{SO}_4\text{Ca}$  y raramente en forma de  $\text{SO}_4\text{Sr}$  o  $\text{SO}_4\text{Ba}$ , la solubilidad de yeso en agua pura es de 2.095  $\text{g.l}^{-1}$  pudiendo llegar a 7.30  $\text{g.l}^{-1}$  si el

contenido de ClNa es de  $131 \text{ g.l}^{-1}$ . Esto indica que el sulfato es muy soluble cuando hay altas salinidades, situación que es favorecida en lixiviados de basureros e industrias de curtido de cuero donde son usadas sales de cromo en los procesos (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) y Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ):** La fuente principal en aguas subterráneas se inicia con la incorporación del  $\text{CO}_2$  atmosférico o del suelo, de ácidos húmicos y oxidación de sulfuros que provocan la disolución de las calizas y dolomitas mediante la reacción siguiente.



Los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  representan la alcalinidad del agua en el sentido que proporcionan la capacidad de neutralizar los ácidos al crear una solución tampón que no es más que la capacidad que tiene esta sustancia ante un ácido para mantener una oposición entre la parte de componente básica de la ácida y mantener así un equilibrio en el pH.

Estos compuestos no son afectados por los procesos redox en las aguas naturales y pueden precipitar con facilidad como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). El ión bicarbonato se encuentra en el agua en un rango de 50 a  $350 \text{ mg.l}^{-1}$ , algunas veces puede llegar hasta  $800 \text{ mg.l}^{-1}$ . En aguas naturales subterráneas con pH inferior a 8.3 la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato (Custodio & Llamas, 2001).

**Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ):** Los nitratos, nitritos y amonio son iones especies del nitrógeno que deben ser considerados de forma conjunta, debido a la conversión que se da de una especie a la otra en los procesos redox (óxido-reductivos), que son dominados por la presencia o ausencia de oxígeno y por la acción de bacterias específicas, que actúan como catalizadores de las reacciones. Al proceso de oxidación de compuestos reducidos de nitrógeno se le denomina **Nitrificación**; mientras que a la reducción de compuestos oxidados de nitrógeno se le conoce como **Desnitrificación**.

Los **nitritos** ( $\text{NO}_2^-$ ) se forman bajo las mismas condiciones pero por oxidación incompleta; y debido a esto se encuentran en pequeñas concentraciones, ya que se encuentran en un estado intermedio entre la oxidación completa (nitratos) y la reducción (amonio), por lo que es muy fácil el que transiten de una zona a otra.

El **amonio** ( $\text{NH}_4^+$ ) predomina cuando hay total ausencia de oxígeno (condiciones anaeróbicas, estado reductivo), el cual, si llega a tener contacto con el aire se oxida con facilidad a  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  o  $\text{NO}_3^-$ .

Los nitratos son originados por los procesos naturales de nitrificación bacteriana, descomposición de la materia orgánica, contaminación urbana, industrial y ganadera. Proviene en pequeña proporción del agua de lluvia, del lavado de los suelos antiguos y de la actividad volcánica.

El origen no siempre es claro, es relativamente estable pero puede ser reducido a  $\text{N}_2^-$  o  $\text{NH}_4^+$  en ambientes reductores. En muchos casos se asocia a ambientes contaminados en cuyo caso se presenta de forma estratificada encontrándose concentraciones mayores en las partes someras del acuífero. Se encuentra normalmente en concentraciones entre 0.1 y 10  $\text{mg.l}^{-1}$ ; pero en aguas contaminadas puede llegar a 200  $\text{mg.l}^{-1}$  y en algunos casos hasta 1000  $\text{mg.l}^{-1}$ . La mayoría de los compuestos nitrogenados pasan a  $\text{NO}_3^-$  en medios oxidantes o a su forma intermedia que es el  $\text{NO}_2^-$  (Custodio & Llamas, 2001).

**Sílice ( $\text{Si}^+$ ):** El origen de la sílice en el agua subterránea es producto de los procesos de hidrólisis de feldespatos y silicatos. Cuando el pH desciende la sílice precipita, por consiguiente el  $\text{CO}_2$  juega un papel muy importante en éste proceso de solubilización. Las rocas carbonatadas contienen muy poca sílice mientras que las plutónicas y volcánicas que pueden llegar a tener hasta 14 veces más que los carbonatos.

La mayoría de las aguas subterráneas presentan concentraciones entre 1 y 140  $\text{mg.l}^{-1}$  en forma de  $\text{SiO}_2$  pudiendo llegar hasta 1000  $\text{mg.l}^{-1}$  en aguas bicarbonatadas sódicas (Custodio & Llamas, 2001).

#### 2.8.2.2.1.2 Cationes

➤ **Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ):** Suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia distribución en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas ígneas aparece como constituyente esencial de los silicatos, especialmente en el grupo de las plagioclasas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ . Las concentraciones de calcio en el agua dulce varía de 10 a 250  $\text{mg.l}^{-1}$  y puede llegar hasta 600  $\text{mg.l}^{-1}$  en aguas con altos contenidos de selenio; en el agua de mar lo normal es 400  $\text{mg.l}^{-1}$  excepcionalmente 50,000  $\text{mg.l}^{-1}$  en salmueras de  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ .

Su solubilidad en solución depende del equilibrio de  $\text{CO}_2 - \text{CO}_3\text{H}^- - \text{CO}_3^{-2}$  que se ve afectado por el intercambio iónico y puede llegar a precipitarse con facilidad como carbonato de calcio. Estas sales varían de moderadamente solubles a muy solubles, su química va muy asociada a la de los iones bicarbonatos y carbonatos en aguas naturales, pudiéndose disolver o precipitar con facilidad al cambiar el pH (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ):** El magnesio es menos abundante que el  $\text{Ca}^{+2}$  en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomitas y calizas dolomíticas), evaporitas y de la alteración de silicatos magnésicos y ferromagnesianos. Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de  $\text{Mg}^{+2}$  en aguas subterráneas, se disuelve más lento que el calcio, pero es más soluble y tiende a permanecer en solución cuando el calcio precipita.

En aguas dulces naturales el contenido en ión  $\text{Mg}^{+2}$  no suele sobrepasar 40  $\text{mg.l}^{-1}$ ; en terrenos calcáreos pueden sobrepasar a veces 100  $\text{mg.l}^{-1}$ , y en terrenos evaporíticos pueden alcanzar valores de 1,000  $\text{mg.l}^{-1}$ .

➤ **Sodio ( $\text{Na}^+$ ):** Su origen se asocia al ataque de feldespatos, feldespatoideos y silicatos, al lavado de suelos y arcillas de origen marino, también a la actividad contaminante del hombre. Es el catión más abundante en el agua de mar.

Las concentraciones del ión sodio se presentan entre 1 y 150 mg.l<sup>-1</sup> en aguas dulces, aunque no es raro encontrar contenidos mucho mayores hasta varios miles de mg.l<sup>-1</sup>, cuando hay presencia de contaminación antropogénica. La solubilidad es muy elevada y difícil de precipitar, es muy afectado por el cambio de bases y suele ir asociado al ion cloruro (Custodio & Llamas, 2001).

➤ Potasio (K<sup>+</sup>): Originado por el ataque a las ortosas y otros silicatos, en ocasiones procede de la contaminación industrial, minera y agrícola. Tiende a fijarse irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico, por ello su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del sodio. Las concentraciones del ión potasio varían de 0.1 a 10 mg.l<sup>-1</sup> en aguas dulces (Custodio & Llamas, 2001).

➤ Hierro (Fe<sup>+3</sup>): Originado por disolución de silicatos ferríferos, rocas sedimentarias, sulfuros y óxidos de hierro, algunas veces puede proceder del entubado de pozos. La concentración de este elemento en el agua está controlada por procesos de equilibrio químico como oxidación-reducción, precipitación, disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros.

Las concentraciones de hierro oscilan entre 1 y 10 mg.l<sup>-1</sup> aunque en aguas con pH entre 6 y 8 llega a presentar concentraciones de 50 mg.l<sup>-1</sup>. Cuando los bicarbonatos se encuentran por debajo de 61.0 mg.l<sup>-1</sup>, lo normal es que se encuentre en concentraciones inferiores a 0.1 mg.l<sup>-1</sup> (Custodio & Llamas, 2001).

### **2.8.2.2.1.3 Metales pesados**

Los metales pesados son el grupo de elementos químicos que tienen una densidad relativamente alta y se caracterizan por su toxicidad en concentraciones bajas. Entre este grupo se incluyen el mercurio (Hg), aluminio (Al), cadmio (Cd), cobre (Cu), litio (Li), manganeso (Mn), níquel (Ni), arsénico (As), cromo (Cr), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Estos elementos son componentes naturales de la corteza terrestre, no se degradan o destruyen. En pequeñas concentraciones son incorporados por las plantas y animales. La ingesta por los animales se hace a través de los alimentos, agua potable y el aire. Algunos de estos metales son esenciales para el metabolismo celular. Sin embargo, en concentraciones altas pueden conducir al envenenamiento. Ejemplo de ellos son el cobre, selenio, cinc, entre otros (Moore & Ramamoorthy, 1984).

Los metales pesados son poco solubles en el medio hidrogeológico, sin embargo, el ambiente ácido generado por los procesos óxido-reductores provocan la incorporación y la movilidad en el agua subterránea (Custodio & Llamas, 1976).

## **2.8.3 Contaminantes del agua subterránea generados en los basureros**

### **2.8.3.1 Formación de los lixiviados**

Los lixiviados son definidos como el líquido que ha percolado por los desechos sólidos, el cual arrastra consigo materiales disueltos y suspendidos, se compone en su mayor porcentaje del líquido que ha entrado de fuentes externas (lluvia) y del líquido producido en la descomposición de los mismos desechos (Tchobanoglous & O'Leary, 1994).

Durante la descomposición de la basura solamente los procesos aeróbicos producen líquidos, aunque en éste proceso dominan los procesos anaeróbicos que son consumidores de agua (Ehrig, 1999). El agua que sale del relleno lo hace por vía superficial, subsuperficial, por evaporación y en mayor proporción como

lixiviados que puede incorporarse a la zona no saturada, la cual se encuentra gobernada por las condiciones hidrogeológicas del área (Figura 5).

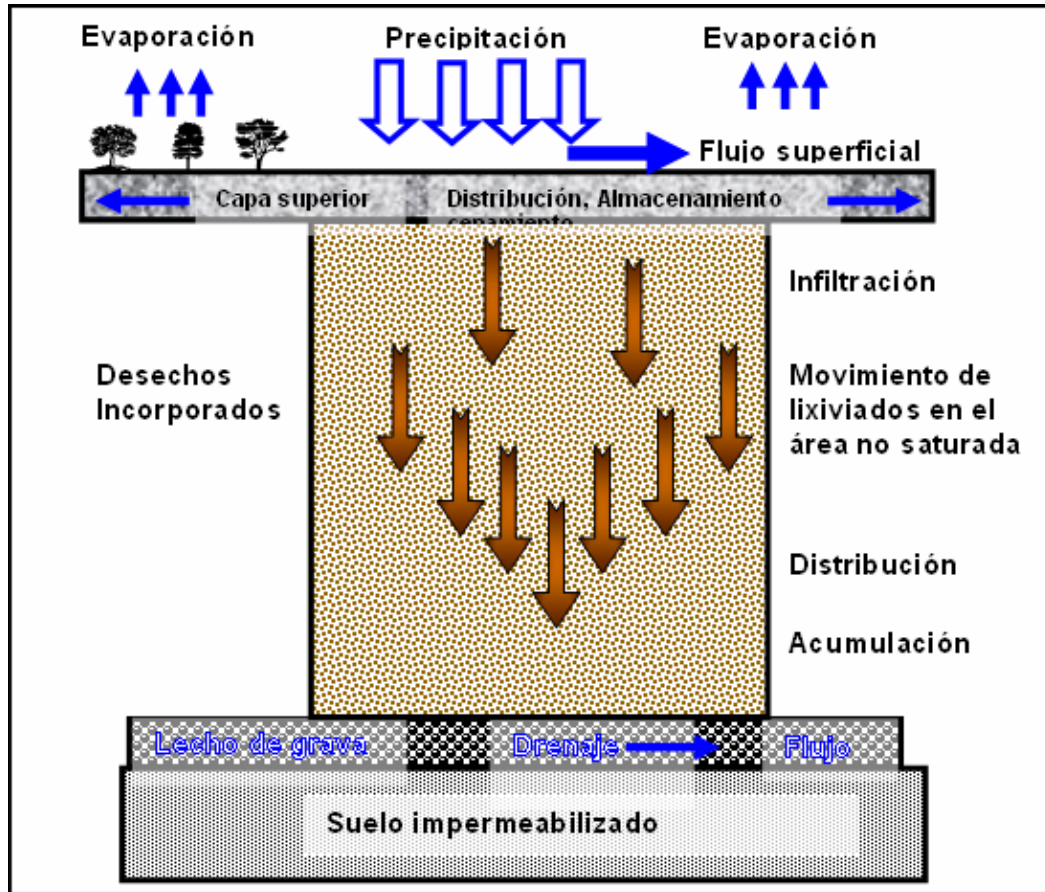


Figura 5. Modelo conceptual del movimiento de lixiviados en rellenos sanitarios (Ehriq, 1999).

La valoración del potencial productivo de lixiviados se logra preparando un equilibrio de agua en el vertedero, esto implica sumar la cantidad de agua que entra al vertedero, la humedad del propio desecho sólido, la humedad del material de cobertura y restar los volúmenes consumidos en las reacciones químicas, pérdidas en forma de vapor de agua saturada en gas. Todo se resume en la siguiente ecuación (Kreithh, 1994).

$$\Delta S_{SW} = W_{SW} + W_{TS} + W_{CM} + W_{A(R)} - W_{LG} - W_{WV} - W_E + W_{B(L)}$$

Donde:  $\Delta S_{SW}$  Cambio en la cantidad de agua almacenada en el desecho sólido en el vertedero (producción de lixiviados).

$W_{SW}$  Humedad en el desecho sólido entrante al vertedero.

$W_{TS}$  Humedad en el lodo que entra en la planta de tratamiento.

$W_{CM}$  Humedad contenida en el material de cobertura.

$W_{A(R)}$  Agua de la parte superior del vertedero correspondiente al agua de lluvia.

$W_{LG}$  Agua que se pierde en la formación del gas de vertedero.

$W_{WV}$  Pérdida como vapor saturado de agua con el gas de Vertedero.

$W_E$  Pérdida de agua por la superficie de evaporación.

$W_{B(L)}$  Agua que sale del sistema de colección, correspondiente al lixiviado.

Para efecto de los cálculos del volumen de los lixiviados en el basurero, se hará la estimación de acuerdo al grado de compactación del relleno, se considerará un porcentaje del agua de precipitación en el área y el tipo de compactación de la basura en el depósito final. Se propone un 40% de la tasa de precipitación (en zonas entre 500 y 1050 mm de precipitación anual) compactado con un equipo de oruga. El valor estimado bajo estas condiciones es aproximadamente 9 m<sup>3</sup>/ha/día (valores encontrados en estudios hechos en rellenos de Europa; Ehrig, 1999).

$$\Delta S_{SW} = 0.40 * W_{A(R)}$$

Esto será lo más apropiado por que se carece de datos y metodologías que podamos implementar para estimar los volúmenes consumidos en las reacciones químicas, pérdidas de agua en forma de vapor saturado en gas, entre otros elementos necesarios para la ecuación. La simplificación de la fórmula genera un mayor error en la estimación; sin embargo, el resultado será igualmente importante.



### 2.8.3.2 Composición de los lixiviados

La composición de los lixiviados está determinada por los procesos de reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en el relleno y por las condiciones ambientales en el basurero. Estas sustancias se incorporan al agua superficial y/o subterránea y su solubilidad es mayor cuando se dan los procesos bioquímicos o los productos finales correspondientes a los procesos de reacciones químicas en el basurero (Ehring, 1999). Ejemplo de ello tenemos la solubilidad de los metales pesados cuando las condiciones de pH son ácidos.

Los procesos que tienen lugar en los rellenos pueden ser en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Una vez que se deposita la basura, los procesos iniciales son los aeróbicos que toman un período desde días a semanas hasta que se haya agotado el oxígeno contenido inicialmente. A partir de ésta condición se inicia la degradación en ausencia de oxígeno denominada degradación anaeróbica.

La descomposición anaeróbica se da en dos fases, en la primera de ellas, **“fermentación ácida”**, los organismos anaeróbicos descomponen las sustancias orgánicas iniciales tales como proteínas, grasas e hidratos de carbono en ácidos grasos menores,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$ . Este proceso se da con la participación de diferentes organismos en condiciones de crecimiento óptimo y diferenciado (Ehrig, 1999).

Una vez bien avanzada la primera fase se tienen los productos ácido acético, ácido fórmico,  $\text{CO}_2$  gaseoso e  $\text{H}_2$  que marcan el inicio de la segunda fase conocida como **“fermentación metanogénica”**. Esta es realizada por organismos estrictamente anaeróbicos, es decir, por bacterias conocidas como metanogénicas especialistas en descomponer los productos de la fermentación ácida convirtiéndolas en metano, sustancias húmicas y agua. Las sustancias húmicas le confieren coloración a los lixiviados, generalmente es parduzca (Ehrig, 1999).

La tasa de crecimiento bacteriano es baja, determinada por las condiciones ambientales del medio ácido, la poca variación de temperatura y el suficiente contenido de humedad. La degradación en el relleno necesita de un equilibrio entre ambas fases.

La razón  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  refleja el grado de degradación de los lixiviados en el relleno y con ello los procesos de reacción bioquímica que están teniendo lugar en un momento determinado. La "fermentación ácida" está caracterizada por valores  $>0.4$ ; es decir, una gran parte de la carga orgánica puede descomponerse bioquímicamente en forma fácil. En la fase de la "fermentación metanogénica", por el contrario, se alcanzan valores  $<0.1$ , que indican que la sustancia orgánica tiene dificultades para continuar su degradación (Ehrig, 1999). En otras palabras si la relación  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  es  $>0.3$  se está en la presencia de lixiviados biodegradables; si está entre 0.1 a 0.3 son maduros; y estabilizados si es  $<0.1$  (Bautista & Timoshina, 2005).

En un relleno o depósito primero se desarrollan las bacterias que realizan la fermentación ácida con una alta tasa de crecimiento. Las bacterias metanogénicas no pueden mantenerse al mismo paso de este proceso por que su tasa de crecimiento es menor, además que los residuos de la fermentación ácida cambian las condiciones ambientales en forma desfavorables, de modo que hay una reducción aún más del crecimiento, esto hace que el equilibrio en la descomposición se logre después de algunos años en el relleno.

La estructura de los materiales orgánicos e inorgánicos en el basurero es transformada por la degradación bioquímica con lo que cambian las condiciones para la lixiviación y la absorción del agua, así como la intensidad y tipo de procesos. El agua que percola sigue la fase de degradación predominante y las diferentes características de pH, carga orgánica que entre otros, dará diferentes condiciones de disolución, esto da una relación estrecha entre el agua y los procesos químicos, bioquímicos y físicos (Ehrig, 1999).

Las condiciones ambientales que se forman en los procesos aeróbicos provocan diferencias en solubilidad de compuestos metálicos cuyo rango de concentraciones está relacionado con los parámetros orgánicos, además, las solubilidades están influidas por la formación de complejos, quelatos y sulfuros. En la Tabla 5 se observan las influencias sobre los valores medios (X) y máximos

para ambas fases de degradación anaeróbica, además de algunos valores encontrados en los lixiviados.

Tabla 5. Valores de los principales parámetros en fases de degradación anaeróbica (fermentación ácida y Metanogénica) cuantificados en lixiviados (Ehrig, 1999).

Parámetros (mg.l <sup>-1</sup> )	Fermentación ácida		Fermentación metanogénica		En lixiviados		
	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
pH	6.10	5.51	8.00	8.50	S/D	S/D	S/D
DBO <sub>5</sub> /DQO	0.58	S/D	0.06	S/D	S/D	S/D	S/D
DQO	22000.00	38100.00	3000.00	4340.00	S/D	S/D	S/D
DBO <sub>5</sub>	13000.00	30425.00	180.00	383.00	S/D	S/D	S/D
Fe	925.00	2120.00	15.00	29.30(282)	S/D	S/D	S/D
Ca	1300.00	2480.00	80.00	575.00	S/D	S/D	S/D
Mg	600.00	1130.00	250.00	534.00	S/D	S/D	S/D
Mn	24.00	65.50	0.65	1.73 (43.50)	S/D	S/D	S/D
Zn	5.60	68.40 (113)	0.64	3.78	S/D	S/D	S/D
Sr	7.20	14.70	0.94	7.25	S/D	S/D	S/D
SO <sub>4</sub>	S/D	1745.00	S/D	884.00	S/D	S/D	S/D
CE (µS/cm)	S/D	S/D	S/D	S/D	13986.00	2100.00	27150.00
NH <sub>4</sub> -N	S/D	S/D	S/D	S/D	741.00	26.30	3075.00
NO <sub>3</sub> -N	S/D	S/D	S/D	S/D	3.30	0.20	35.00
N <sub>2</sub> orgánico	S/D	S/D	S/D	S/D	593.00	8.30	4245.00
Cl	S/D	S/D	S/D	S/D	2119.00	134.00	4953.00
K	S/D	S/D	S/D	S/D	1085.00	94.00	2420.00
Na	S/D	S/D	S/D	S/D	1343.00	70.00	3560 (5750)
Fósforo total	S/D	S/D	S/D	S/D	5.70	0.50	30.20
Alcal. total	S/D	S/D	S/D	S/D	6609.00	677 (54)	11575(28368)
As	S/D	S/D	S/D	S/D	0.1260	0.0070	1.56
Pb	S/D	S/D	S/D	S/D	0.0870	0.0080	1.02
Cd	S/D	S/D	S/D	S/D	0.0052	0.0010	0.00629 (0.141)
Cr	S/D	S/D	S/D	S/D	0.2750	0.0290	1.57
Co	S/D	S/D	S/D	S/D	0.0500	0.0040	0.954 (1.70)
Cu	S/D	S/D	S/D	S/D	0.0650	0.0100	1.39
Ni	S/D	S/D	S/D	S/D	0.1660	0.0183	2.05 (25.3)
Hg	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.0002	0.061 (0.16)
F	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.60
Fenol	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0.0220	75.00

S/D: Sin dato

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Exploración geofísica

##### ➤ Metodología de campo

El método utilizado para la realización del levantamiento eléctrico fue el de Sondeos Eléctricos Verticales Continuos (SEVC), el cual utiliza un gran número de electrodos, 25 o más, conectados a un cable multi-conector. Se utiliza una microcomputadora junto a un conmutador para seleccionar automáticamente los electrodos a utilizar en el ciclo de mediciones (Anexo 4).

El equipo utilizado es el Lund Imaging System, que consiste en una unidad ABEM terrameter SAS 4000, una unidad selectora (conmutador) de electrodos ABEM ES464, un total de 81 electrodos conectados a lo largo de 4 cables de 100 metros de longitud con 21 tomas de electrodos en cada cable, con espacio entre tomas de 5 metros (Anexo 4).

La secuencia de las mediciones a tomar (protocolo) es editada en un archivo de texto que se introduce a la unidad SAS 4000, que automáticamente seleccionará los electrodos apropiados para el ciclo de mediciones.

La secuencia de mediciones para el arreglo de electrodos se puede describir de la siguiente forma: por ejemplo en el caso del arreglo Wenner, se realizan todas las combinaciones posibles utilizando un espaciamiento “a” entre electrodos igual a 5 m. En la primera medición se utilizan los primeros 4 electrodos siendo los electrodos 1 y 4 utilizados para enviar la corriente y los electrodos 2 y 3 los para la lectura de potencial. En la siguiente medición se utilizan los electrodos 2, 3, 4 y 5 siendo los electrodos 2 y 5 los de corriente y los electrodos 3 y 4 los de lectura de potencial. Este proceso es utilizado hasta que los electrodos 78, 79, 80 y 81 son utilizados para la última medición con espaciamiento “a”. La siguiente secuencia de mediciones es utilizada con un espaciamiento “2a” igual a 10 metros. La primera medición es realizada ahora con los electrodos 1, 3, 5 y 7, siendo esta vez

los electrodos inyectoros 1 y 7 y los electrodos 3 y 5 son los de potencial. Este proceso se repite para espaciamientos “3a”, “4a”, “5a” y “6a” (Figura 6).

Una técnica usada para cubrir un perfil es denominado como roll-along, el cual consiste en añadir al perfil un quinto cable y eliminar el primero, realizándose mediciones incluyendo los siguientes 100 metros. De esta manera se puede hacer perfiles eléctricos con longitudes variables, con la limitante de capacidad de procesamiento de la computadora utilizada para la inversión de gran cantidad de datos.

En el proceso de inversión se produce una curva de campo para cada sondeo a lo largo del arreglo e interpretado por métodos computarizados para producir un modelo geo-eléctrico de capas de resistividades verdaderas y espesores para cada curva de SEV. Para cada dos modelos adyacentes se produce un panel de modelos en el cual los horizontes de diferentes resistividades pueden ser delimitados (Zohdy, 1989).

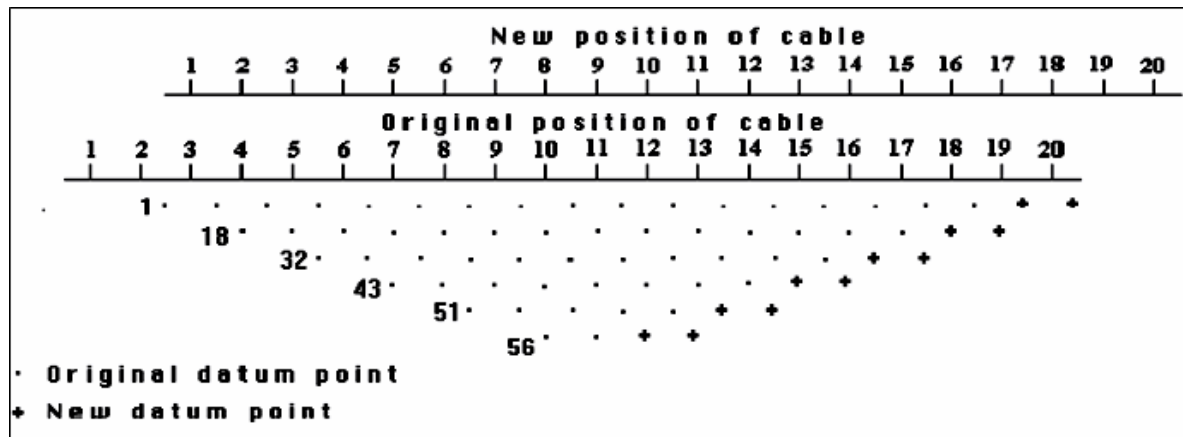


Figura 6. Arreglo para la elaboración de una pseudo-sección eléctrica.

El método común para la representación cualitativa de los datos de SEVC es el de pseudos-secciones. Se construye una pseudos-sección por el ploteo de datos en un diagrama, usando el eje X para representar la distancia a lo largo de la línea de estudio y el eje Y o Z para representar la distribución de resistividades (Dahlin, 1993).

La pseudos-sección, representa una imagen aproximada de la distribución de resistividades en el subsuelo. Es útil como un medio para presentar los valores

medidos de resistividades aparentes y como una guía inicial adicional para la interpretación cuantitativa.

El programa de Inversión utilizado fue el **RES2DINV** (Inversión de resistividades en dos dimensiones), el cual determina de manera automática un modelo bi-dimensional para el sub-suelo con los datos obtenidos de los sondeos eléctricos verticales continuos (Griffiths & Baker, 1993).

Para hacer las mediciones se hizo transmitir corriente en el rango de 10 a 200 mA, tomando en cuenta la distancia entre electrodos contiguos (5 m) y las características del subsuelo. La transmisión de la corriente fue para un máximo de tres ciclos, garantizando la alta estabilidad y calidad de los datos, reflejada en una desviación estándar menor al 0.02 % entre ciclos y con una medición de al menos 400 puntos por cada perfil.

Se realizaron cinco sondeos eléctricos verticales continuos (SEVC), empezando con uno de 500 m en el margen sur del basurero y con dirección aproximada oeste- este; y otro de 600 m transversal al anterior en dirección sur-norte al este del basurero a unos 100 m del borde del mismo. Los perfiles tres y cuatro se trazaron paralelos al primero; y el quinto se trazó paralelo al segundo, a intervalos aproximados de 100 metros entre perfiles y de 600 metros de longitud cada uno. En la Tabla 6 se muestran las coordenadas UTM de la localización de los SEVC y la orientación de los mismos.

Los perfiles de SEVC se nombraron enumerándolos según el orden en que fueron realizados, antecediendo el nombre del lugar donde fueron hechos, es decir Joya 1 (J-1), Joya 2 (J-2), Joya 3 (J-3), Joya 4 (J-4) y Joya 5 (J-5) (Figura 7).

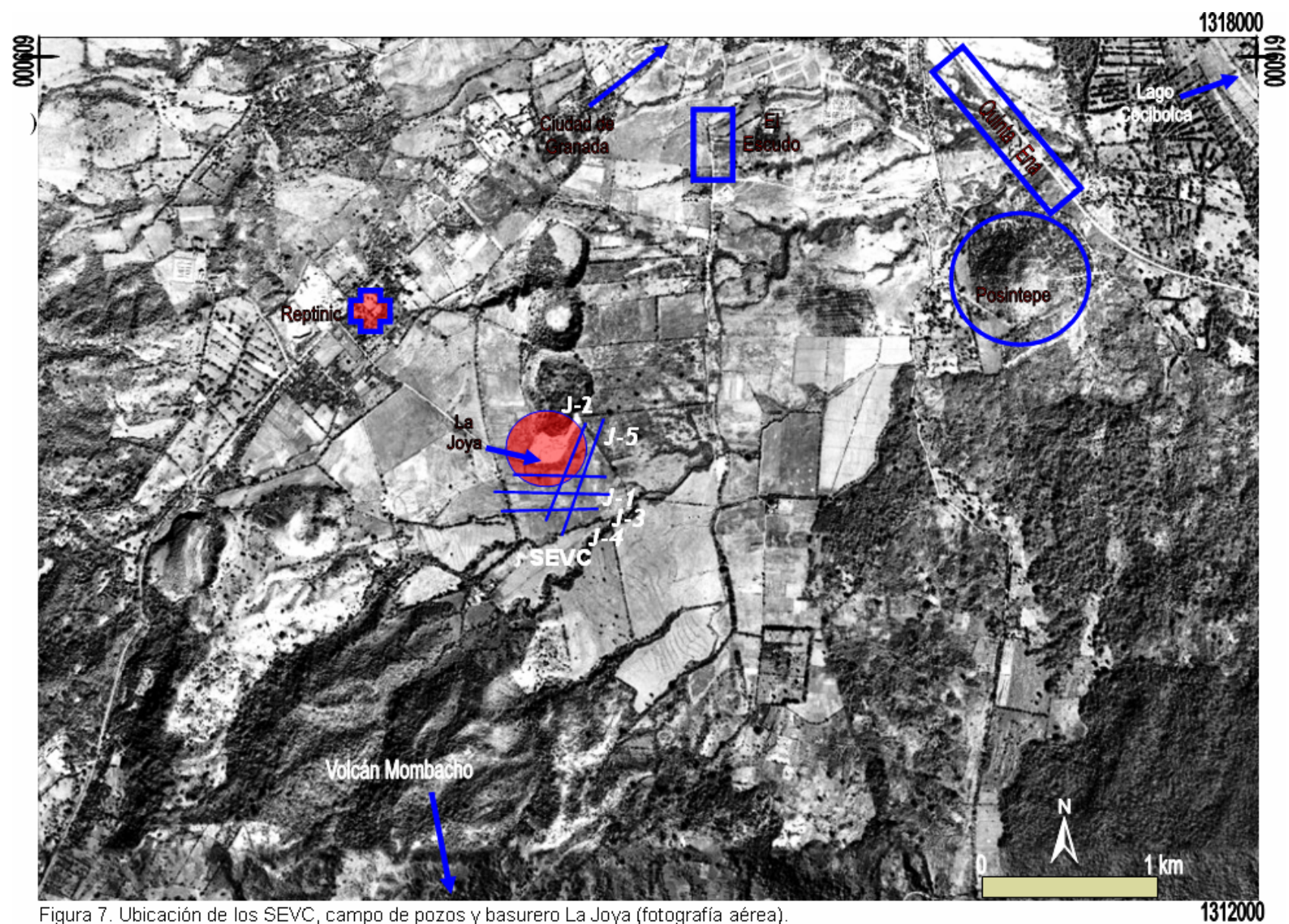


Figura 7. Ubicación de los SEVC, campo de pozos y basurero La Joya (fotografía aérea).



Tabla 6. Coordenadas de los SEVC realizados en el sector del basurero La Joya (Figura 7).

PERFIL No.	SEVC	Coordenadas del perfil en UTM				ORIENTACIÓN DEL PERFIL
		Inicio		Final		
		Este (X)	Norte (Y)	Este (X)	Norte (Y)	
1	Joya 1	611616	1315271	612108	1315293	E - W
2	Joya 2	611841	1315100	612053	1315661	SW-NE
3	Joya 3	611483	1315153	612075	1315230	E-W
4	Joya 4	611539	1315042	612131	1315119	E-W
5	Joya 5	612007	1315012	612111	1315396	SW-NE

### 3.1.1 Procesamiento de datos geofísicos

La secuencia de mediciones, tipo de arreglos y parámetros del estudio fueron asignados en un archivo de texto, el cual es leído por un software instalado en el equipo (microcomputadora). Después de leer el archivo, el programa automáticamente selecciona los electrodos apropiados para cada medición, una vez tomadas las mediciones son almacenadas en la computadora.

Los datos de resistividad aparente medidos en cada perfil son representados a través de curvas obtenidas al graficar las resistividades aparentes en el eje de las ordenadas y las distancias AB/2 en el eje de las abscisas.

La información fue procesada usando un algoritmo (programa Res2Dinv) que calcula valores de resistividad eléctrica. Con estos valores calculados se construye un modelo del subsuelo y los compara con los datos medidos. La diferencia de mínimos cuadrados entre los datos medidos y los calculados es llamado error "rms", cuyo valor para este estudio fue inferior a 8.8% indicando una alta consistencia de los resultados (Anexo 4).

La ubicación de los perfiles geoelectricos se realizó tomando las coordenadas geográficas mediante un receptor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con precisión horizontal de 5 m.



### **3.2 Toma y preservación de las muestras de agua subterránea y lixiviados**

Los métodos de muestreo han sido diseñados con la intención de obtener muestras representativas de agua en los acuíferos. Cada uno de estos métodos minimiza el potencial de introducción de contaminantes tanto en el acuífero como en la muestra. Se efectuaron dos campañas de muestreo (época seca y época lluviosa, 2003-2004) para lograr obtener las características hidrogeoquímicas que podrían presentarse en la etapa de estudio. Los principales compuestos analizados en los lixiviados del basurero y en el agua subterránea de pozos y minipiezómetros se detallan en la Tabla 7.

Todas las muestras para el análisis físico-químico fueron colectadas y preservadas siguiendo la metodología implementada en los laboratorios del CIRA y descritas para cada parámetro específico en los Procedimientos Normalizados Operacionales (PON).

#### **Análisis Físico-Químico: (PNO-HQ-GEN-99)**

Las muestras de agua para los análisis físico-químicos fueron colectadas en frascos plásticos de 4,5 l y preservadas a bajas temperaturas en termos con hielo hasta la llegada al laboratorio para su inmediato análisis. Estos análisis incluyen, pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, turbidez, color verdadero, cationes, aniones, nitritos, STD, sílice disuelta, hierro total y fluoruros.

#### **Amonio y Nitrógeno Kjeldahl:**

Un litro por muestra fue tomado en frascos de vidrio color ámbar con capacidad de 1 l. Las muestras fueron preservadas a lo inmediato con 1 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado y transportadas al laboratorio en termos con hielo.

Tabla 7. Parámetros físico-químicos analizados en lixiviados del basurero y en el agua subterránea de pozos y minipiezómetros ubicados en área de estudio en Granada.

Parámetro	Símbolo	Parámetro	Símbolo
<b>Iones conservativos</b>		<b>Parámetros físicos</b>	
Magnesio	Mg <sup>+2</sup>	Color verdadero	C. V.
Sodio	Na <sup>+</sup>	Turbidez	Turb.
Potasio	K <sup>+</sup>	pH	pH
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	Sólidos totales disueltos	S.T.D.
<b>Iones no conservativos</b>		Sólidos Totales	S. T.
Calcio	Ca <sup>+2</sup>	Conductividad eléctrica	C.E.
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	<b>Residuales</b>	
Bicarbonatos	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Compuestos fenólicos	Fenol
Carbonatos	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Demanda Bioquímica de O <sub>2</sub>	DBO <sub>5</sub>
<b>Macronutrientes</b>		Demanda Química de O <sub>2</sub>	DQO
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Aceites y Grasas	Ac. & Gr.
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<b>Metales pesados</b>	
Amonio	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Aluminio total	Al
Fósforo total	F. T.	Arsénico total	As
Fósforo total disuelto	F.T.D.	Cadmio total	Cd
Fósforo reactivo disuelto	F.R.D	Zinc total	Zn
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	Cobre total	Cu
Dureza total	D. T.	Cromo total	Cr
Alcalinidad total	Alc.T.	Litio total	Li
Alcalinidad a fenolftaleína	Alc. F.	Manganeso total	Mn
Boro total	B	Mercurio total	Hg
Carbono orgánico disuelto	COD	Níquel total	Ni
Fluoruros	F <sup>-</sup>	Plomo total	Pb
Hierro total	Fe		
Sílice	Si		
Sulfuros	S <sup>-2</sup>		

### **Aceites y Grasas:**

Las muestras de agua fueron colectadas en frascos de 2.5 l y preservadas con 2,5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, seguidamente fueron trasladadas a los laboratorios en termos con hielo para su posterior análisis.

### **Demanda Química de Oxígeno:**

Muestras fueron tomadas en frascos de vidrio de 100 ml con cuello esmerilado y preservadas con 1 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, luego fueron trasladadas a los laboratorios en termos con hielo.

### **Demanda Bioquímica de Oxígeno:**

Muestras de agua fueron colectadas en frascos de plástico de 1 l e inmediatamente trasladada bajo refrigeración en termos con hielo (el análisis de las muestra debe realizarse antes de 48 horas una vez que la muestra ha sido tomada).

### **Sulfuro total:**

Las muestras de agua fueron colectadas en botellas de vidrio usadas para  $\text{DBO}_5$  de 300 ml con tapón esmerilado; los frascos estaban previamente endulzados con 12 gotas de acetato de Zinc. Al momento de la toma de la muestra los frascos no fueron enjuagados. Al momento de captar las muestras se evitó la agitación de las muestras asegurando que las muestras no tuvieran burbujas de aire para evitar la aireación de las mismas. A lo inmediato las muestras fueron preservadas con 2 ml de hidróxido de sodio al 6 Normal y trasladadas al laboratorio en termos con hielo.

### **Compuestos fenólicos:**

Las muestras de agua fueron colectadas en frascos de vidrio color ámbar de 1 l, preservadas con 1.5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, se guardaron en termo con hielo.

### **Carbono Orgánico Disuelto (COD):**

Para el análisis de COD se siguieron los procedimientos descritos en PON-HQ-AN-MA-023. Las botellas en que se colectan las muestras fueron enjuagadas unas tres veces; posteriormente se filtraron las muestras en el campo a utilizando un filtro de acetato de celulosa de 0.45  $\mu\text{m}$ . El volumen mínimo de muestra recolectada fue de 50 ml cantidad que permitirá analizar replicas. Los frascos utilizados en la colecta de las muestras fueron de vidrio de color ámbar. Durante el traslado las muestras fueron refrigeradas en termos con suficiente hielo.

### **Metales pesados:**

Los procedimientos que se emplearon para la toma y preservación de las muestras de metales pesados se describen en los PON MP-AA-GEN-006 suministrados por el laboratorio de absorción atómica. Las botellas se enjuagaron tres veces con el agua del sitio donde se tomó la muestra, luego fue llenada la botella hasta el borde y se le agregó 2 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado. Al final de la toma fueron colocadas en termo con hielo.

### **3.3 Mediciones de parámetros de campo en agua subterránea y lixiviados**

Antes de iniciar un muestreo es importante hacer mediciones in situ, tales como medir el nivel inicial del agua antes de la purga del pozo; entre otros. Algunas mediciones de parámetros es importante realizarlas inmediatamente después de la colecta de la muestra, debido a que ciertas propiedades del agua cambian, especialmente aquellas que son dependientes de la temperatura tales como el oxígeno disuelto (OD), potencial redox ( $E_H$ ) y pH. La medición de todos estos parámetros permite tener una idea de las condiciones anóxicas u óxicas, reductoras u oxidativas, ácidas o básicas existentes en el acuífero.

Los parámetros medidos en el campo fueron:

- pH: Medido con un ph-metro de campo marca ORION modelo 230.

- Conductividad eléctrica (CE): Medida in situ con un conductímetro ORION modelo 105.
- Temperatura: Fue medida en el campo con el mismo equipo usado para la medición de pH Orión modelo 230.
- Potencial Redox ( $E_H$ ): Medido con un medidor de  $E_H$  marca ORION modelo 250.
- Oxígeno disuelto (OD): Medido con un equipo YSI modelo 51.
- Alcalinidad: Medida in situ con un kit de campo HACH.

### **3.4 Metodología analítica**

Los análisis de las muestras en los laboratorios se hicieron siguiendo la metodología implementada en el CIRA descrita en los PON para cada parámetro basados en el Standard Methods, agrupadas en la tabla del Anexo 2.

Las concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) se determinaron con metodología indirecta usando la vinculación de la absorbancia UV con la concentración (COD, metodología implementada por Brandstetter y colaboradores -1996-, en aguas naturales de región forestal de Austria).

Encontraron la pendiente definida por regresión lineal entre el COD medido con el equipo de medición de carbono orgánico disuelto y la absorbancia UV a 254 nm, igualmente obtenida por Bengtsson, G., & Picado, F. (1993) en mediciones de aguas superficiales en la zona de Chontales Nicaragua por mediciones de absorbancia UV y con el equipo para COD, donde define un factor de corrección aproximado de 3.15.

Las muestras (18) tomadas en el área de estudio fueron medidas el mismo día de la toma de la muestra con el espectrofotómetro de UV, y al mes fueron enviadas 5 de las mismas que se habían preservado congeladas, a los laboratorios de la universidad de Lunds en Suecia para hacer las lecturas con el equipo de medición de carbono orgánico.

### **3.5 Pruebas de infiltración**

Para hacer una valoración de la tasa de infiltración en el área de estudio, la ubicación de las cinco pruebas de infiltración se localizaron en las diferentes series de suelo (Figura 8) caracterizados en el mapa de uso de suelos (INETER, 1971). Se hicieron dos pruebas en el tipo de suelo cráter pedregoso (ERb) ubicado en el sector del basurero, una al oeste del basurero en suelos de tipo MV1c, otra al norte del basurero en suelos franco arcillosos (GRb) y una última al noreste del basurero en la parte baja de la cuenca.

La mejor medida de la tasa de infiltración se hizo en el campo, pues así se conservó las condiciones naturales del suelo; ésta se midió con los infiltrómetros tipo doble cilindro.

Los infiltrómetros son un par de cilindros abiertos hechos de metal, las dimensiones de los anillos usados para las pruebas fueron; anillo interno (diámetro de 0.310 m y una altura de 0.505 m) y anillo externo (diámetro de 0.460m y altura de 0.430 m).

Las mediciones consisten en insertar ambos anillos en el suelo a una profundidad aproximada de 0.10 m, ésta inserción debe hacerse con cualquier instrumento capaz de golpear los bordes de los anillos, pero tratando de no afectar las condiciones naturales del suelo, se debe seleccionar el nivel a que se va a mantener el agua durante la prueba.

Para comenzar la prueba, se vierte suavemente el agua en el cilindro interno a la altura deseada de manera que no se altere las condiciones del suelo, seguidamente usando un cronómetro y una regla se inicia las mediciones de descensos en el nivel del agua a intervalos de 1, 2, 5, 10, 20 y 30 minutos.

La prueba es concluida cuando la tasa de infiltración o velocidad con que desciende el nivel del agua es constante.

Para determinar la velocidad de infiltración se utilizó la fórmula.

$$I = \Delta h \times 60/t = f_c$$

Donde:  $I$  : Velocidad de infiltración en mm/h.

$\Delta h$  : Diferencia de altura del agua.

$t$  : Diferencia de tiempo.

$f_c$  : Infiltración Básica.

Los gráficos de la tasa de infiltración versus tiempo ayudan a ilustrar los cambios en la tasa de infiltración. Cuando en el gráfico presenta una tendencia estable, ese es el valor de infiltración básica ( $f_c$ ), que se obtiene promediando los últimos 3 valores (Anexo 3).

Una vez encontrado el valor promedio de infiltración básica se estima el porcentaje de infiltración para ese suelo mediante el método analítico más conveniente. En nuestro caso, el modelo analítico más apropiado para determinar la infiltración es el de Schosinsky, G. & Losilla, M. (2000); que toma como base el promedio de lluvia mensual. Esta ecuación fue derivada para la región de Costa Rica con similares condiciones ambientales a las de Nicaragua.

Para el cálculo de la infiltración se utilizó la ecuación siguiente:

$$I = 0.88CP$$

En donde:  $C = (K_p + K_v + K_{fc})$  para  $K_p + K_v + K_{fc} < 1$

$C = 1$  para  $K_p + K_v + K_{fc} > 1$

$C = 0$  para  $P < 5$  mm/mes

$$K_{fc} = 0.267 \ln(f_c) - 0.000154 f_c - 0.723$$

$I$  : Infiltración mensual (mm/mes).

$C$  : Coeficiente de infiltración igual o menor a 1.

$P$  : Precipitación mensual (mm/mes).

- $K_p$  : Fracción que infiltra por efecto de pendiente (adimensional).
- $K_v$  : Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (adimensional).
- $K_{fc}$  : Fracción que infiltra por textura de suelo (adimensional).
- $f_c$  : Infiltración básica del suelo medida en el campo mm/día entre 16 a 3000 mm/d.

### 3.6 Calicatas

A la par de las pruebas de infiltración se hicieron dos calicatas para una mejor valoración in situ de las características y comportamiento hidrogeológico del área de estudio. Se construyeron dos calicatas en los sitios destinados a las pruebas de infiltración. Una de ellas se ubicó en el sitio donde se realizó la de prueba de infiltración No. 4 a una distancia aproximada de 2 km hacia el noreste del basurero en la cercanía de uno de los pozos del campo de pozos denominado Escudo 1 y la otra a unos 200 m al Este del basurero (Figura 1).

La descripción se realizó siguiendo la guía práctica de descripciones de perfiles de la FAO (1977) con el apoyo de un ingeniero agrónomo. En el Anexo 3 se presentan los detalles de las descripciones.

La descripción de perfiles consistió en los detalles siguientes:

- I. Información acerca del sitio de la muestra.
- II. Información general del suelo.
- III. Breve descripción general del perfil.
- IV. Descripción de los horizontes del suelo.
- V. Interpretación de la descripción.



### **3.7 Lixiviados**

Se diseñaron e instalaron 7 minipiezómetros (Anexo 5); 3 de ellos ubicados en el basurero y 4 en la zona de descarga del agua subterránea a unos 200 m de las costas de Lago Cocibolca (Figura 1), con el objetivo de muestrear la presencia de lixiviados en el agua subterránea que llega a esta zona de descarga.

Para la estimación de la cantidad de lixiviados se tomaron datos de precipitación de la estación meteorológica código 69030 propiedad de INETER en la ciudad de Granada (INA), que cuenta con registros de 38 años, en el período 1958 -1995. Es una estación cercana al área del basurero aproximadamente a unos 2.5 km al norte del mismo, se estimó el área del basurero equivalente a 21,737.83 m<sup>2</sup>.

Se presentan y se comparan los resultados de dos métodos para la estimación de la cantidad de lixiviados producidos (Anexo 1). El primero fue realizado por PROCÓNSUL Ingenieros S.A. (1996) a través del balance hídrico, usando para ello los datos de la estación meteorológica Nandaime con registros de 19 años; y el realizado en este trabajo es mediante la aplicación de la metodología propuesta por Ehrig (1999).

Este último se deduce de los conocimientos y experiencias adquiridas en estudios de basureros (rellenos). Se asocia la cantidad de lixiviados producidos al tipo de compactación que se hace a la basura, agua que penetra en el basurero proveniente de la precipitación, los procesos bioquímicos y por la propia humedad de la basura. Asigna un factor de producción de lixiviados correspondiente al 40% del agua de la precipitación cuando se trabaja con compactadores de oruga (buldózer).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 Suelos**

Como se mencionó anteriormente, la disposición inicial de la basura se efectuó en la depresión natural (hoya volcánica) conocida como La Joya, sin que existiera un estudio previo de las condiciones del área para contar con criterios apropiados de selección del sitio y sin la construcción de ninguna infraestructura, que minimizarían los impactos que se generarían con la acumulación de basura y la producción de lixiviados.

Los terrenos donde se encuentra localizado el basurero La Joya (Figura 8) se componen de terrenos escarpados indiferenciados (Serie Qfu), muy superficiales, de 30 a 75% de pendiente y de textura franco arenosa a arcillosa muy pedregosa que le confiere un buen drenaje vertical y horizontal (INETER, 1971). Esta característica de los suelos de la zona, facilita el drenaje y la acumulación de lixiviados hacia la parte inferior de la hoya volcánica, lo que puede permitir de esta manera la incorporación de lixiviados generados en el basurero a la zona no saturada (transporte vertical).

Los lixiviados superficiales generados en el basurero, se dispersan en los suelos circundantes, siguiendo el gradiente topográfico; una fracción es transportada por la escorrentía superficial (al este del basurero), la que se dispone en la dirección del gradiente hidrogeológico hacia la zona de descarga en el Lago Cocibolca (noreste del basurero); y la otra parte de los lixiviados tiene un rápido movimiento vertical, el cual es facilitado por la alta permeabilidad de los suelos y las precipitaciones que caen en la zona, pudiendo alcanzar el nivel freático.

Los tipos de suelos en los alrededores del basurero se inician con los vérticos (Serie VCb2) seguido de las tierras aluviales (TXg1) y el cráter pedregoso (ERb). Tienen pendientes ligeras con máximo de 4%; son profundos (más de 80 cm) y la textura de los materiales que los conforman le confiere buen drenaje. El resto de

toposecuencias que se encuentran en la parte media del trayecto del flujo superficial y subsuperficial empezando con los suelos vérticos (VCa4) podrían también incorporar parte del lixiviado que se escurriera superficialmente hasta ésta parte, aunque los siguientes suelos tanto aluviales (TXb) como los franco arcillosos (GRc) permitirían un mejor drenaje hacia la zona de descarga.

Los suelos de la zona de descarga, son catalogados como de pantanos y ciénagas (M2a2) y suelos de playa (M1fa); estos últimos con altas permeabilidades al estar compuestos por arenas de playa. En ellos se instalaron los minipiezómetros para determinar la calidad físico-química del agua que descarga en el Lago Cocibolca y de ésta manera evaluar la longitud de la estela de contaminantes (trayectoria) generados en el basurero, a través del impacto que los lixiviados puedan provocar en el agua subterránea.

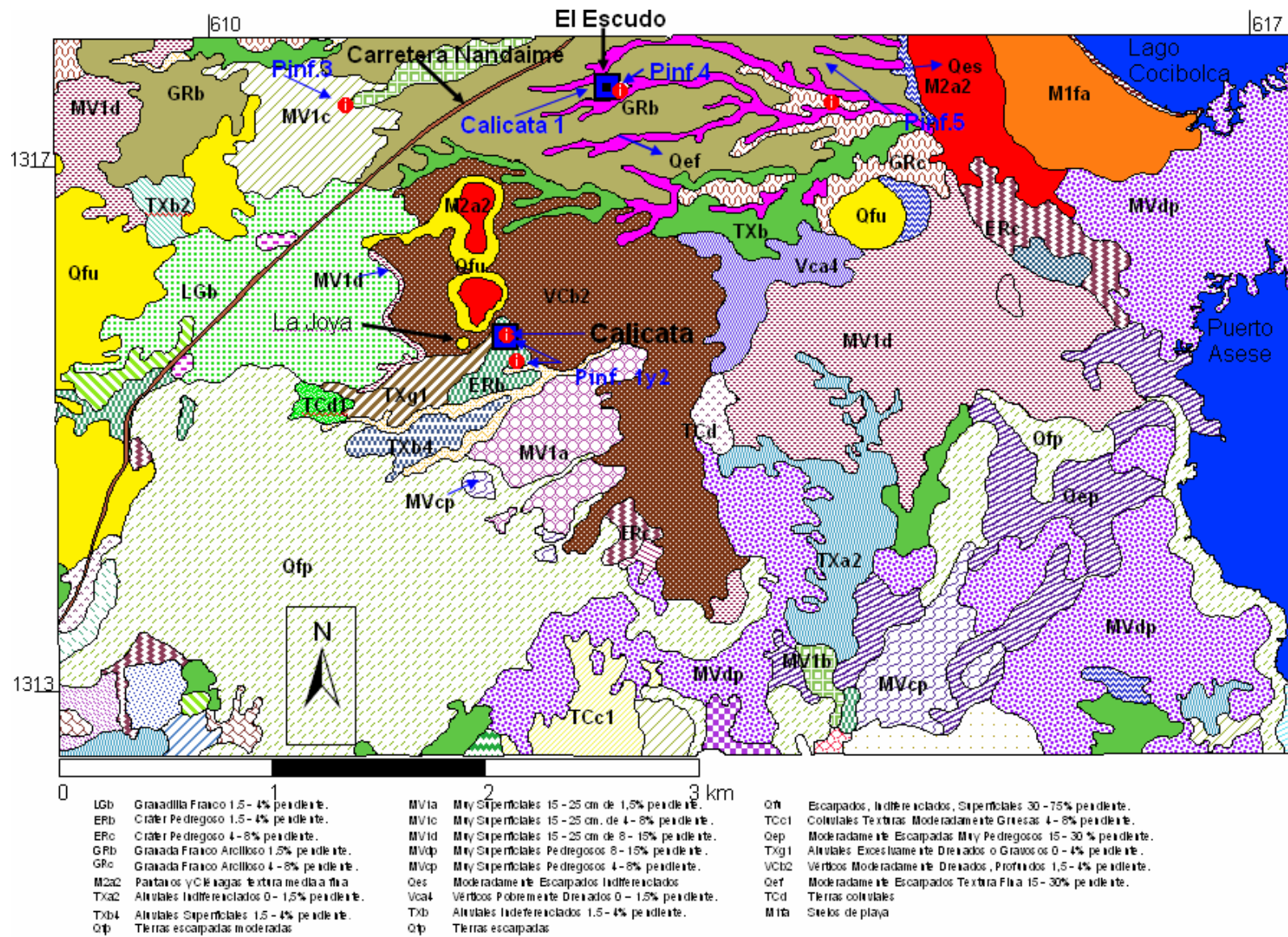


Figura 8. Tipos de suelos en el área de estudio y la ubicación de calicatas y pruebas de infiltración ejecutadas en el área (INETER 1971).

Al norte del basurero se destaca claramente una zonificación de materiales menos permeables (Figura 8). Esta área está compuesta por suelos de la serie Granada franco arcillosos (GRb), que se extienden por toda la zona norte de la ciudad de Granada. Presenta suelos moderadamente drenados de coloración pardo rojizo (probablemente por la presencia de óxidos) y de tierras moderadamente escarpadas de texturas finas arcillosas (Qef).

Con el fin de determinar la textura superficial presente en el sector del basurero y al norte del mismo; se excavaron dos calicatas, la primera en el campo de pozos El Escudo (UTM 612634 y 1317137) de un metro cuadrado y con 0.90 m de profundidad y otra calicata de de igual tamaño con 1.40 m de profundidad ubicada a una distancia de 200 m al este del basurero (UTM 611936 y 1315209), entre ambas hay una distancia aproximada de 2 km (Figura 9).

La **calicata número 1**, se localiza aproximadamente a 2 km en dirección norte del basurero. La profundidad de diagnóstico es de 0.90 m en suelos de la serie Granada (GRb) franco -arcilloso (Figura 8). Tiene pendientes bajas, ligeramente ondulados. El escurrimiento superficial de este suelo es medio y está levemente erosionado, presenta muchas fisuras (agrietamientos), con muy poca vegetación circundante, en su mayoría pastos (INETER, 1971).

Tiene buen drenaje horizontal; el vertical varía de malo a moderado; no hay afloramientos rocosos; porosidad abundante y fina; el pH es de 5.7 en húmedo con tendencia a disminuir en profundidad del perfil. El límite entre horizontes es claramente diferenciado por el tamaño de las grietas. Pocas raíces en todo el perfil, presencia de abundantes minerales de color negro vítreo, posiblemente por restos de lapilli o fragmentos volcánicos indeterminados. Éste suelo podría ser clasificado como del tipo **Oxisol hasta Ultisol**. Se caracteriza por ser altamente meteorizado y lixiviados con alto contenido de óxidos amorfos de hierro y aluminio que le confiere una coloración rojiza. Es el segundo orden más común en los trópicos y subtrópicos, con una cobertura del 18%. Son suelos ligeramente

ácidos, entre 6 y 7 de pH (Sánchez, 1981). A continuación se detallan los horizontes.

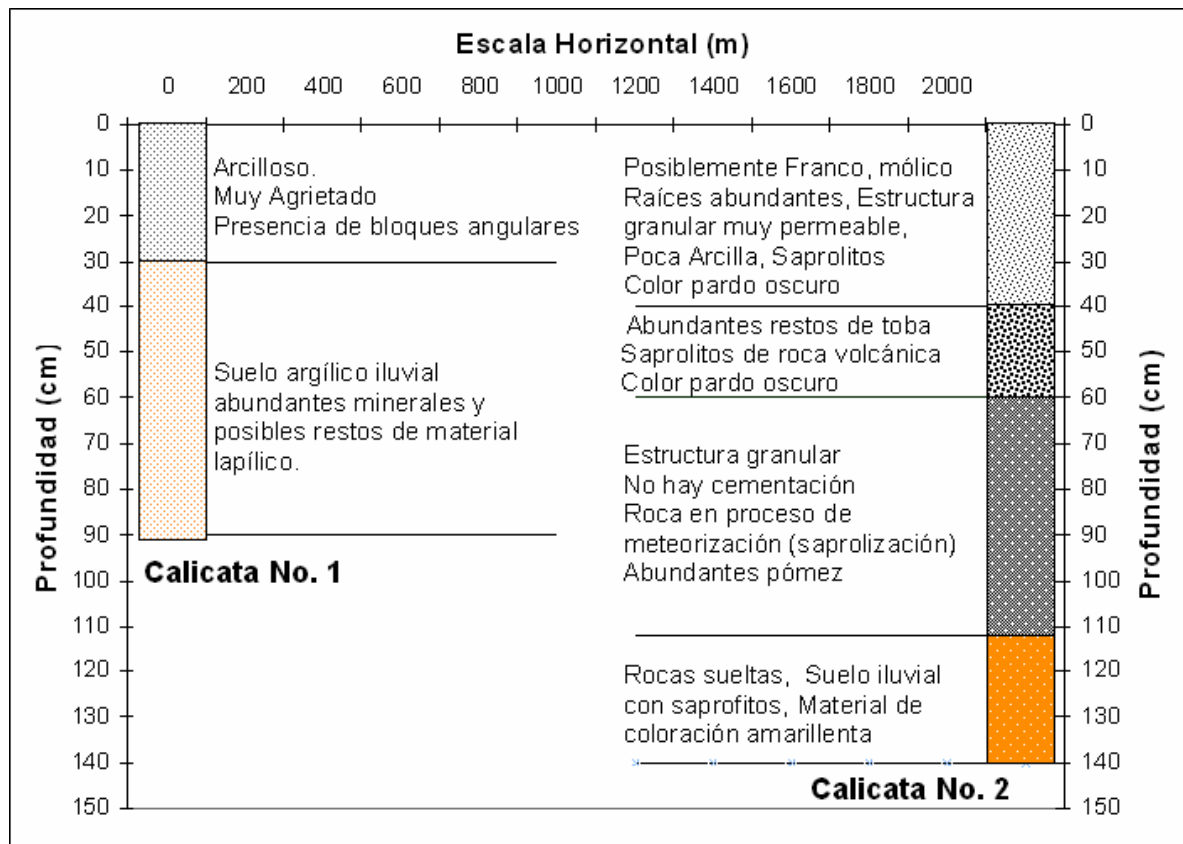


Figura 9. Características de los horizontes del suelo, sector del basurero (Calicata No. 2) y aproximadamente a 2 km al norte del basurero (Calicata No. 1).

**Horizonte A.** Este horizonte presenta una textura arcillosa y posee concreciones ferro-magnesianas con algunos granos de material pumítico; no tiene cutanes. Es de consistencia dura en seco y fuertemente adhesiva en húmedo. Es de coloración parda rojizo en seco y pardo oscuro en húmedo. Se encuentra estructurado en bloques angulares, grietas pequeñas y abundantes, hay poca presencia de raíces, consistencia dura sin formar ladrillo y con un espesor de 30 cm.

**Horizonte B.** Es un horizonte iluvial fuertemente enriquecido con arcillas expandibles y óxidos de hierro, presenta grietas de hasta de 7 cm y algunas



intrusiones de material del Horizonte A por las grietas profundas. De coloración rojo en seco y pardo rojo oscuro en húmedo. Se localiza en el perfil de 30 a 90 cm de profundidad. Se puede catalogar como un horizonte argílico enriquecido con sesquióxidos, estructura en grandes bloques angulares y prismáticos y de consistencia muy dura casi ladrillo (Figura 10).



Figura 10. Calicata No. 1, al Norte del basurero en suelos franco arcillosos.

La **calicata No. 2** se realizó aproximadamente 100 m al este del basurero con una profundidad de 140 m; se lograron distinguir 3 horizontes (Figura 11). Los suelos presentes en ésta área pertenecen a Granada serie cráter (ERb), con pendiente baja de 0 - 2 %, ligeramente ondulado. El escurrimiento superficial de este suelo es medio y está levemente erosionado. Es un área donde se cultiva maíz y frijoles; con poca vegetación natural circundante, alterada por la ganadería. Presentan buen drenaje horizontal y vertical; con suelo muy seco. En la calicata se observa que hay afloramientos de fragmentos de rocas de diversos tamaños. No hay cementación, porosidad abundante y fina en el epipedón y gruesa en profundidad. El pH es de 6.12 en el horizonte "A", de 6.69 en "B" y de 6.62 en "C". Probablemente son suelos con un epipedón mólico, con alto contenido de materia orgánica (posiblemente originada desde el basurero) y que se dispersa a los suelos circundantes en los cuales se acumula y se distribuye en profundidad. Son suelos suaves cuando están secos (friables).

Franco mólico con  
alto contenido de  
materia orgánica

Tobas y saprolitos

Saprolitos y  
pómez

Rocas sueltas y  
saprolitos



Figura 11. Calicata No. 2, sector este del basurero, suelos franco-arenosos - pedregoso:



Este tipo de suelos ocupa una distribución del 1% en los trópicos. Sin embargo, por el origen volcánico de los materiales de esta zona, podríamos hablar de orden **Inseptisoles** y sub-orden **Andosoles** (Sánchez, 1981). A continuación se detallan cada uno de los horizontes localizados en esta calicata.

**Horizonte A.** Tiene una profundidad menor a los 0.40 m; franco, posiblemente un epipedón mólico; de coloración pardo en seco y pardo oscuro en húmedo; con abundantes raíces y piedras superficiales; en el perfil el suelo es muy friable y de estructura granular. Es un suelo permeable con poca arcilla.

**Horizonte B.** Es un horizonte de cambio con profundidad de 0.40 a 0.60 m, muy poroso de coloración pardo en seco y pardo oscuro en humedad; textura friable, muy suelto aún en húmedo, con poca arcilla, presenta abundantes rocas pequeñas y material volcánico de pequeño tamaño, probablemente saprolitos de origen lapílico, fragmentos tobáceos sueltos en una matriz de suelo color café rojizo y toba enriquecida con sales. Es un suelo altamente permeable. Aparentemente se manifiesta como un horizonte de acumulación de orgánicos originados desde el basurero La Joya, asociado a la actividad de aradura de los horizontes superiores.

**Horizonte C.** Con una profundidad de 0.60 a 1.12 m y más. De coloración amarillo en seco y anaranjado en húmedo (posiblemente material férrico). Presenta una estructura granular muy suelta de 8 a 12 cm de diámetro, los mayores fragmentos rodeados de una matriz de suelo iluvial pero con abundante material saprolítico (lapilli). No hay cementación pero con abundantes rocas en procesos de meteorización (saprolizados) y se observa la presencia de pómez.

## **4.2 Infiltración**

Cinco pruebas de infiltración se realizaron en éste estudio en la época seca. Los sitios fueron seleccionados tomando en cuenta el uso y tipo de suelo (Figura 8). En el Anexo 3 se presentan las coordenadas, cálculos de infiltración, coeficientes y gráficos de cada prueba. A continuación se detallan las observaciones de cada prueba realizada

### **Pruebas 1 y 2**

Las pruebas de infiltración 1 y 2 se realizaron en el área cercana al sitio en donde se depositan los residuos sólidos y donde se da la influencia de la escorrentía superficial y subsuperficial de los lixiviados del basurero que llegan a través de las cárcavas que pasan desde el sitio del basurero hasta éstas áreas.

La prueba de infiltración número uno fue realizada a una distancia aproximada de 600 m al sureste del basurero y la prueba número dos a unos 200 m al este del basurero. Ambas, realizadas en suelos de tipo cráter pedregoso; Erb (Figura 8).

En esta área el perfil litológico se caracteriza por ser franco–arenoso-pedregoso con altas tasas de infiltración (INETER, 1971). Las características presentes en ésta zona (corroboradas con la textura descrita en la calicata excavada en este mismo sector (Figura 9) y el comportamiento observado en los SEVC practicados en la misma (Figura 15)), permitirían entonces la incorporación de altos volúmenes de lixiviados en la zona no saturada, los cuales llegarían rápidamente al nivel freático y contaminar las aguas subterráneas.

Los suelos presentes en este sitio tienen entre 1.5 y 4.0 % de pendiente y se describen como ligeramente inclinados al norte del Volcán Mombacho. Estos suelos son moderadamente superficiales, con un escurrimiento superficial moderadamente lento y erosión leve; lo que facilita la incorporación de los lixiviados. Estos suelos son aptos para pastos y bosque. Por su alta permeabilidad son susceptibles a la sequía (INETER, 1971)

Los resultados de infiltración fueron de 77 mm/h y 48 mm/h en las pruebas 1 y 2, respectivamente. Ambas pruebas presentaron altas tasas de infiltración típicas de suelos arenosos que superan los 30 mm/h (CIRA – CARA, 2003). En los sitios de las pruebas, los suelos se caracterizan por tener permeabilidad y textura variada, su origen deriva de basaltos, tobas, ignimbritas, escoria y grava (INETER, 1971); claramente destacado en la calicata excavada en ésta área (Figura 9).

### **Prueba No. 3**

La prueba número 3 se realizó aproximadamente a 1.5 km al noroeste del basurero en el sector del poblado conocido como San Pedro (zona de mayor altura a la del basurero). El tipo de terrenos en el cual se practicó la prueba es del tipo MV1c (suelos superficiales); los cuales tienen características muy parecidas a los suelos presentes en el sector sureste del basurero (Figura 8), la diferencia estriba en que la pendiente es mayor (de 4 a 8%). Tienen un escurrimiento superficial moderado y la erosión es alta cuando no hay cobertura vegetal. La profundidad de este tipo de suelos es de 0.15 a 0.25 m; están asociados con vertisoles (VC), aluviales (TX) y suelos del cráter (ER); tienen textura variada y se derivan de basaltos tobas, ignimbritas, escoria y gravas (INETER 1971).

La tasa de infiltración resultante es de 50 mm/h, lo cual indica que son suelos altamente permeables que permiten una infiltración efectiva máxima del 88% del agua de precipitación sobre ellos (Anexo 3).

### **Prueba No. 4**

Los suelos del área seleccionada para la prueba 4 (Figura 8), corresponden a la serie Granada franco-arcilloso (GRb). Son suelos profundos y de coloración rojiza; probablemente lateríticos y de permeabilidad baja, son derivados de cenizas volcánicas que descansan sobre pómez. Presentan pendientes ligeramente inclinadas (de 1.5 a 4.0 %), con un escurrimiento superficial medio y en su mayoría levemente erosionado. Este tipo de suelos es muy apto para cultivo de zonas de pendiente casi planas con adecuadas prácticas de conservación (INETER, 1971). Su extensión alcanza hasta la zona norte de Granada.

Los valores de infiltración obtenidos promedian los 54 mm/h. Al igual que las pruebas anteriores, es una tasa de infiltración alta, típica de suelos arenosos. En la calicata No. 1 excavada en esta área en época seca, se observa que el suelo presenta grietas de desecación, lo que le confiere una alta permeabilidad secundaria a través de los bloques subangulares formados por el agrietamiento (Figura 10).

### **Prueba No. 5**

Los terrenos en donde se realizó la prueba 5, presentan suelos que corresponden a la serie Granada franco-arcilloso (GRb) y son iguales a los suelos en donde se practicó la prueba de infiltración 4. Estos suelos presentan un alto contenido de materia orgánica en la parte superior, moderada en la parte media y bajo en la parte inferior. Este tipo de suelos se encuentran en las zonas de bosque subtropical (INETER, 1971). Esta zona, presenta la menor tasa de infiltración (20 mm/h). Valores similares son característicos de suelos intermedios, limo arenosos, con mediana permeabilidad.

De manera general, las tasas de infiltración en el área de estudio son altas; correspondientes con los suelos de tipo limo-arenosos a arenosos. Los datos indican que el 88 % de la precipitación que cae sobre el área, se infiltra efectivamente (Anexo 3).

En estudios previos, se estableció tres áreas de recarga: una Zona “A” que abarca los bordes de la laguna de Apoyo; la zona “B” que incluye el Volcán Mombacho, bajando entre el borde de la laguna de Apoyo y el cerro Posintepe hacia el norte; y la zona “C” que se extiende entre el costado este del Cerro Posintepe y la costa del Lago Cocibolca hacia el norte (Montgomeri-Chan, 1981, Espinoza, M., 1999). De estas tres zonas la que presenta **mayor permeabilidad es la zona “B”**, en donde por consiguiente se da la mayor recarga en el acuífero. Es en esta zona, en donde está ubicado el basurero.

El basurero y los sitios seleccionados para las primeras tres pruebas de infiltración se encuentran localizados en la zona “B” y dada las altas tasas de infiltración en

los tres sitios seleccionados en la zona “B” (77, 48 y 50 mm/h, respectivamente) y el tipo de suelo presente (franco arenoso pedregoso), aunado a la cantidad de basura depositada (alrededor de 70 ton/día) y el volumen de lixiviados producidos (31.7 m<sup>3</sup>/día); representan un alto riesgo de contaminación al cual se encuentra expuesto el acuífero en esta zona por la incorporación de los máximos volúmenes de lixiviados producidos en el basurero los cuales escurren de forma superficial y subsuperficial en el área. El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas con los lixiviados del basurero, representan una amenaza a futuro a la población de Granada que recibe el suministro de agua de los pozos de ENACAL localizados en el campo de pozos Quinta Ena, localizados a unos 3 km del basurero en dirección de las líneas de flujo subterráneo y al campo de pozos El Escudo, localizados a 2 km al noreste del basurero.

La otra zona donde se realizaron las pruebas de infiltración 4 y 5, tiene menor capacidad de infiltración por estar compuesta de materiales con alto contenido de arcilla que en verano presentan abundantes grietas de desecación. Con las primeras lluvias se da una lixiviación (lavado) de los materiales superficiales que son incorporados a través de las grietas a las partes mas profundas del perfil del suelo; constituyendo esto un riesgo ya que pueden llegar a incorporarse contaminantes que estén presentes sobre la superficie del suelo al momento de las primeras lluvias de la época de invierno.

### 4.3 Hidrología e Hidrogeología

La distribución de las lluvias se da a lo largo de todo el año (Figura 12), se observan dos períodos más o menos definidos; el primero, se empieza a notar desde noviembre a abril que corresponde a la época seca conocida comúnmente en Nicaragua como **verano**. El segundo período comprende la época lluviosa desde mayo a octubre y se le conoce como **invierno**. Entre julio y agosto se da una pausa de las lluvias, período que se conoce con el nombre de **canícula**, la cual dura aproximadamente un mes y en donde las precipitaciones disminuyen y

otro período entre septiembre y octubre, donde se presentan las mayores precipitaciones del año. Los datos meteorológicos de esta zona fueron facilitados por INETER y corresponden al período 1958 – 1998 (Anexo 1), refleja una precipitación promedio anual de 1331 mm. La infiltración de estas precipitaciones constituyen la fuente principal de la recarga del acuífero.

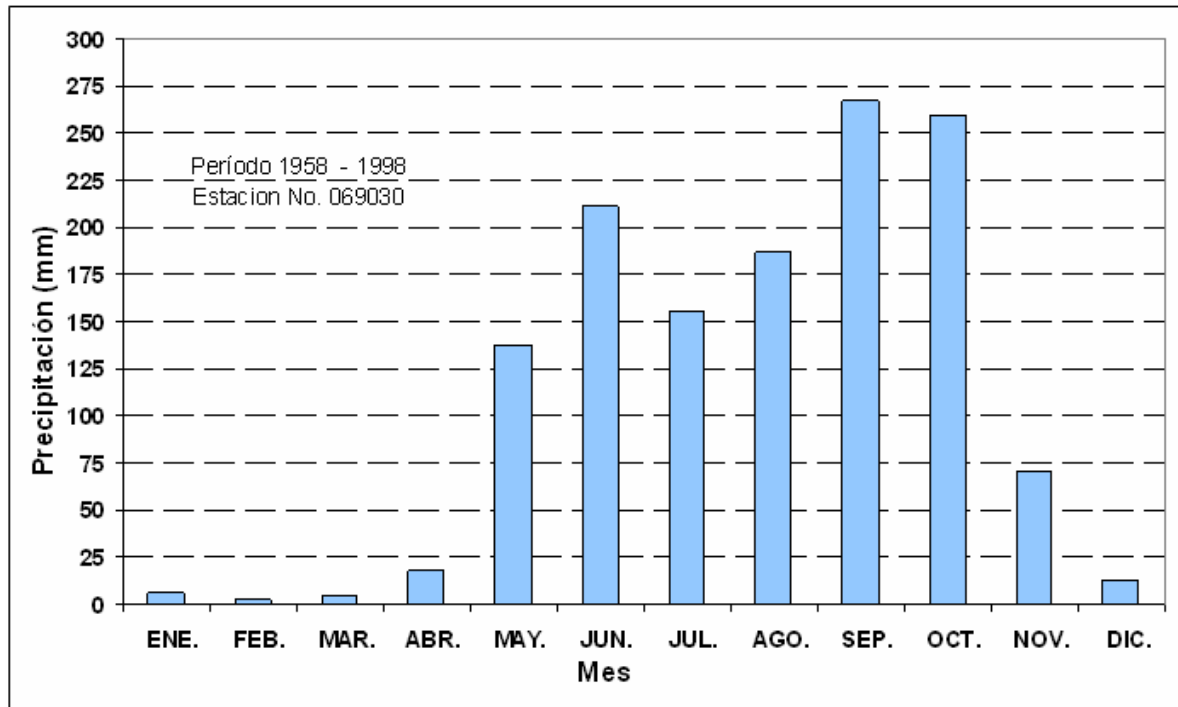


Figura 12. Precipitación media mensual, Período 1958-1998. Estación INA-Granada.

No se cuenta con datos del volumen de la escorrentía superficial del área, ya que ésta solo se da cuando hay precipitaciones abundantes con capacidad de saturar el suelo y poder generarla. Además, están condicionadas por la poca vegetación y las altas tasa de infiltración presentes en la zona (88 % de la precipitación) que no permiten la presencia de caudales prolongados o permanentes después de las lluvias.

La parte hidrogeológica contó con el estudio físico-químico de 28 pozos perforados y 11 pozos excavados; así como también, se diseñaron e instalaron 7 minipiezómetros con el objetivo de la obtención de los lixiviados para realizar los

análisis físico-químicos y metales pesados. Tres (3) minipiezómetros se ubicaron en el sitio donde se deposita la basura; y 4 más se instalaron en la zona de descarga cercanos a la costa del Lago de Nicaragua (Cocibolca) con el mismo fin (Figura 13). En todos los pozos y minipiezómetros se midieron los parámetros de campo, mismos que son interpretados en el acápite de hidrogeoquímica.

Los niveles piezométricos varían desde los 3 m en las costas del Lago de Nicaragua (en la zona de descarga) hasta los 152 m en pozos perforados cercanos a la laguna de Apoyo en la zona de recarga. Esta información nos permitió mostrar que los flujos subterráneos fluyen desde la zona de la laguna de Apoyo hacia el Lago en dirección oeste - este y también desde la parte alta del Volcán Mombacho en dirección Noreste (Figura 13).

Los parámetros hidrogeológicos de mayor importancia en el área han sido obtenidos en varias investigaciones (Espinoza, M., 1999; Montgomeri – Chan, 1981; Hecht, G., 1975; PNU, 1973). Son típicos de los acuíferos aluvionales y piroclastos cuaternarios de la región pacífica nicaragüense (Losilla et al, 2001); su característica principal son las transmisividades de medias a altas. Los valores de transmisividad encontrados en los campos de pozos de ENACAL (El Escudo y Quinta Ena) van desde los 688 m<sup>2</sup>/día en el PP-05 (Quinta Ena 2) de mediana transmisividad; a los 2208 m<sup>2</sup>/día (Quinta Ena 1) con el mayor valor de transmisividad (Espinoza, 1999).

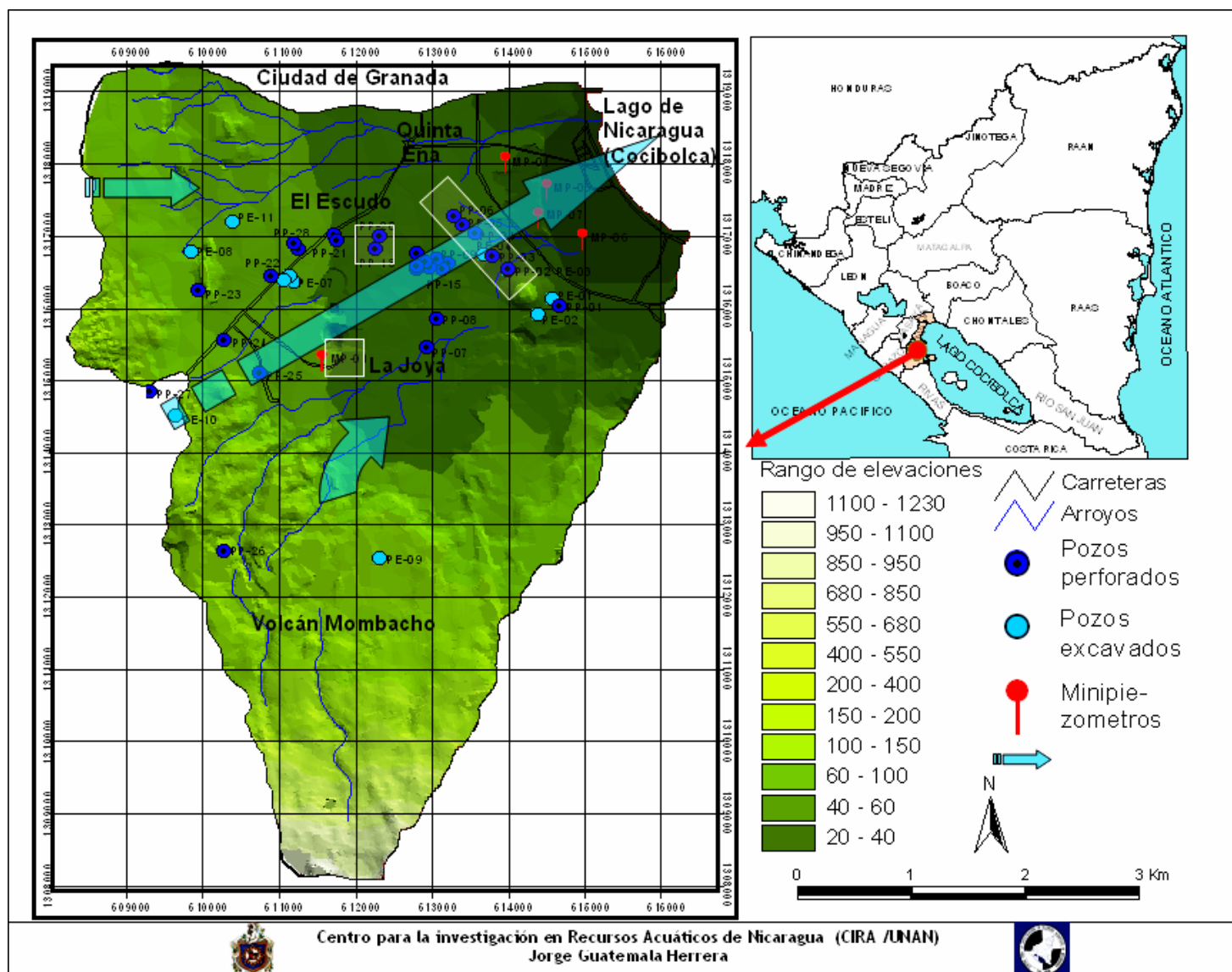


Figura 13. Ubicación del basurero La Joya y dirección del flujo subterráneo.



Los niveles dinámicos medidos en ambos campos de pozos nos muestran que el gradiente hidráulico se está ejerciendo hacia el campo de pozos Quinta Ena. Campo donde se da una mayor extracción de agua subterránea (Figura 14). En los pozos PP-03 y PP-04 se presentan mayores abatimientos ejercidos por el bombeo, situación que a mediano plazo crearía conos de influencia a las áreas circundantes en dirección del basurero, las cuales coincidirían con las líneas de flujo que vienen desde ese sector y sobre las que podría agilizar la emigración de la estela de contaminación originada en el basurero.

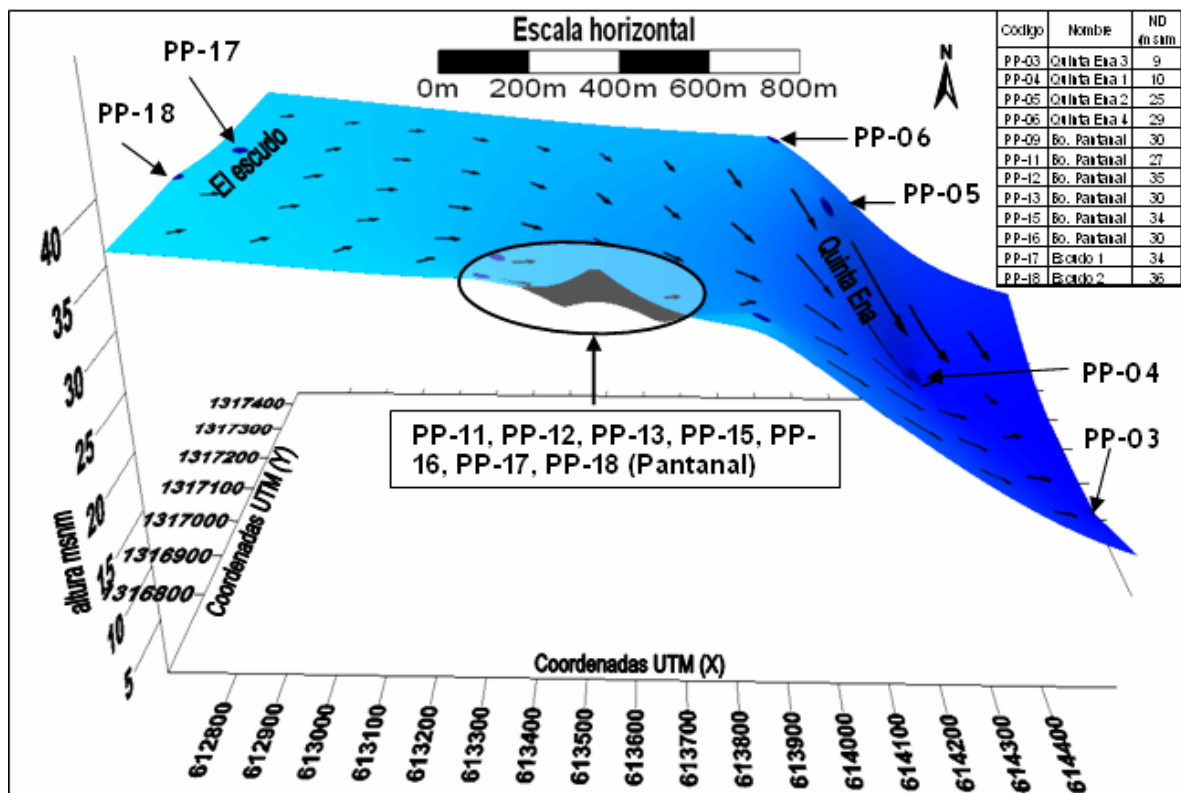


Figura 14. Gradientes hidráulicos (Niveles Dinámicos) y dirección de flujo de agua subterránea desde el campo de pozos El Escudo al campo de pozos Quinta Ena.

#### 4.4 Geología y geofísica

En la Figura 7 se muestra la ubicación del sitio donde se practicaron los sondeos eléctricos verticales continuos (SEVC); y la inversión de los resultados de los 5 sondeos identificados como Joya 1, Joya 2, Joya 3, Joya 4 y Joya 5 en la Figura 15, donde en cada uno de ellos se muestra el rango de resistividades en la escala de colores correspondientes. El eje vertical “Y” representa la profundidad (en metros) y los ejes horizontales “X” y “Z” representan la orientación y distancia total cubierta por cada sección respectiva, en metros.

Las propiedades resistivas en el primer perfil (Joya 1) reflejan dos zonas claramente diferenciadas; una con poca resistividad menor a los 22 Ohm-m a una profundidad de 10 m y de unos 50 m de espesor, éste tipo de resistividad se asocia a la anomalía generada por los lixiviados del basurero, los que están caracterizados por valores altos de conductividad, la que presentó valores entre 11,690 y 14,990  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  para la época seca al momento de realizar los perfiles. Este comportamiento es similar al estudiado por Miletto, M. y colaboradores (1997) en un vertedero de Italia mediante la aplicación de métodos geofísicos.

La otra zona presenta altas resistividades superiores a los 100 Ohm-m, la que correspondería al medio hidrogeológico de origen volcánico (cuaternario volcánico aluvial). La profundidad del nivel freático podría estar delimitada por la parte inferior del perfil entre los 60 y 70 m de profundidad y con resistividades intermedias entre 38 y 68 Ohm-m (Anexo 4).

El segundo perfil (Joya 2) presenta un horizonte de unos 10 m de espesor muy superficial a la altura del basurero con resistividades menores a 26 Ohm-m, con tendencia a profundizarse hacia el norte del basurero. A los 200 m del inicio del perfil, se observó una probable anomalía que podría asociarse a una falla, donde se está dando migración de los lixiviados (flujo preferencial) hacia el nivel freático. (Anexo 4). Con esto, se observa que hay movimientos sub-superficiales y verticales de los lixiviados en el área del basurero.

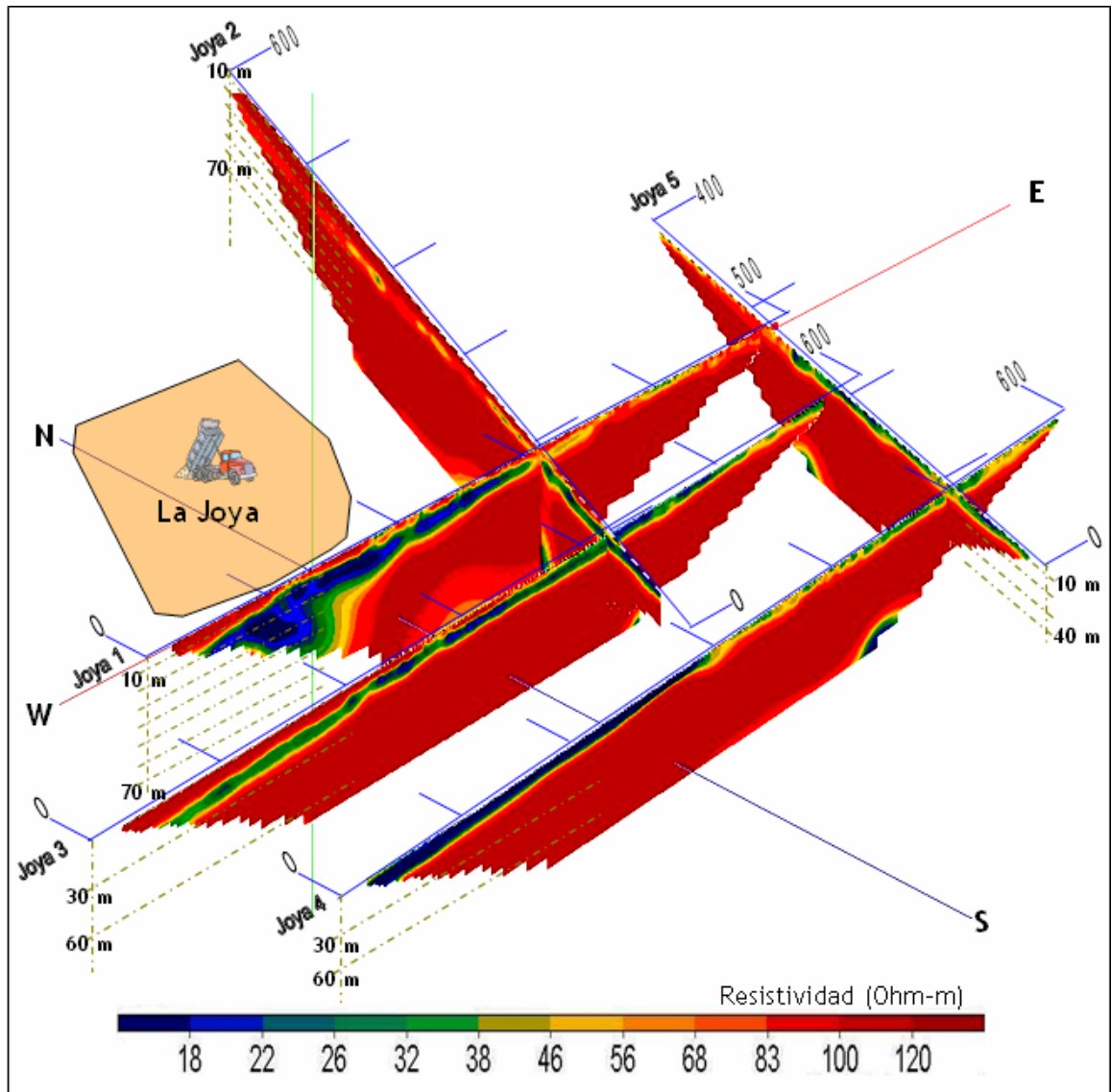


Figura 15. Sección eléctrica SEVC realizada en el basurero La Joya de Granada (distancia y profundidades en metros).

En los perfiles Joya 3, Joya 4 y Joya 5 se observa que los lixiviados a la altura del basurero han ingresado a una profundidad aproximada de 10 m al medio hidrogeológico formando un estrato de unos 20 m de espesor, que tiende a aflorar a la superficie al alejarse del basurero en la misma dirección que viaja la escorrentía superficial (E-SE). Esto comprueba que los lixiviados no solo están emigrando en el eje vertical sino también a través del flujo sub-superficial.

El perfil de distribución en profundidad (Figura 16), muestra que las bajas resistividades asociadas a la presencia de lixiviados, se aprecian en los primeros

20 m. Hay una distribución en toda el área tanto lateral (por donde viaja la escorrentía superficial hacia la zona de descarga), como vertical (en dirección al nivel freático); en ambos casos se inicia en el basurero, la cual está dominada por las características geológicas que imperan en el área del basurero. Los suelos son de origen volcánico de permeabilidad alta como lo demuestra el perfil geológico descrito para este sector de Granada.

Entre los 22 y 46 m se evidencia que el acuífero presenta una estela definida con dirección Sur-Sureste caracterizada por baja resistividad asociada a la saturación del medio hidrogeológico con alto contenido salino proveniente de la lixiviación del basurero. Esta dirección que toma la estela se puede asociar a los lineamientos y fallas que tienen esta misma dirección y que atraviesan desde la zona de Zacate Ligüe cercano al cementerio de la ciudad de Granada, pasando por los cráteres u hoyas volcánicas del lugar “La Joya” hasta la parte media del Volcán Mombacho descritas en estudio de INETER & Český Geologický ústav Praha (1998).

De los 46 a los 60 m se visualiza una concentración de la estela hacia la base del basurero, zona con bajas resistividades. Hacia el Este y Sureste se aprecia la presencia del nivel freático que en esta zona se presenta entre los 55 y 60 m de profundidad según los niveles piezométricos (Figura 6).

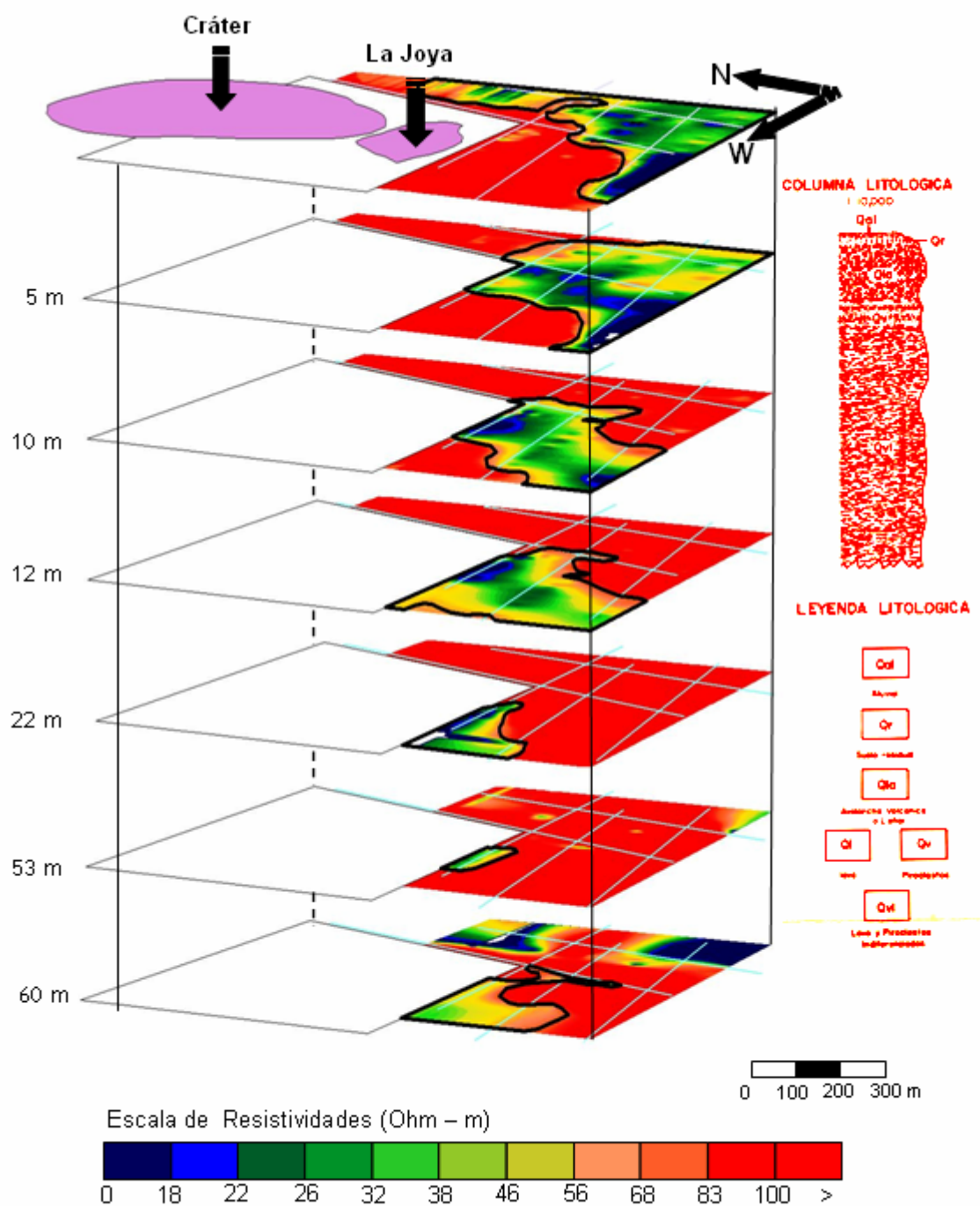


Figura 16. Resistividad eléctrica multicapa 0 m a 60 m de profundidad encontrada en el área del Basurero La Joya y perfil geológico según C. J. Ferrey O. y R. L. Williams en IGN, 1971.

## **4.5 Hidrogeoquímica y lixiviados**

### **4.5.1 Lixiviados**

#### **4.5.1.1 Producción de lixiviados**

La variación del volumen de lixiviados está en correspondencia con el régimen de precipitaciones presentes en la zona. Este hecho se ha observado en estudios realizados en diferentes sitios de deposición de basuras en Latinoamérica y en países desarrollados (Ehrig, 1999; Cárdenas, 1996; Kreeith, 1994). La metodología empleada en estos estudios, ha demostrado que el mayor porcentaje de las precipitaciones sobre basureros es convertido en lixiviados.

Además de la cantidad de agua que pueda llegar al basurero y que contribuye con la producción y distribución de los lixiviados, existen otros factores que ejercen influencia sobre la distribución de los mismos en el medio hidrogeológico; estos son la dispersión, absorción y biodegradación; factores que son difíciles de medir en el campo.

El régimen de precipitaciones presentes en el área se da en el período de mayo a octubre; con la pausa de lluvias entre julio y agosto debido a la **canícula**. Las mayores precipitaciones en el año, se presentan entre septiembre y octubre. Esta variación en el comportamiento de las precipitaciones, se ve reflejado directamente en la producción de lixiviados a lo largo del año. La Figura 17 refleja los resultados de dos métodos para la estimación de la cantidad de lixiviados producidos, el primero fue realizado por PROCÓNSUL Ingenieros S.A. (1996) a través del balance hídrico, usando para ello los datos de la estación meteorológica Nandaime con registros de 19 años; y el segundo mediante la aplicación del método propuesto por Ehrig (1999) tomando en cuenta el promedio de 38 años (1958-1995) de registros de precipitaciones de la estación meteorológica Granada-INA (Anexo 1) .

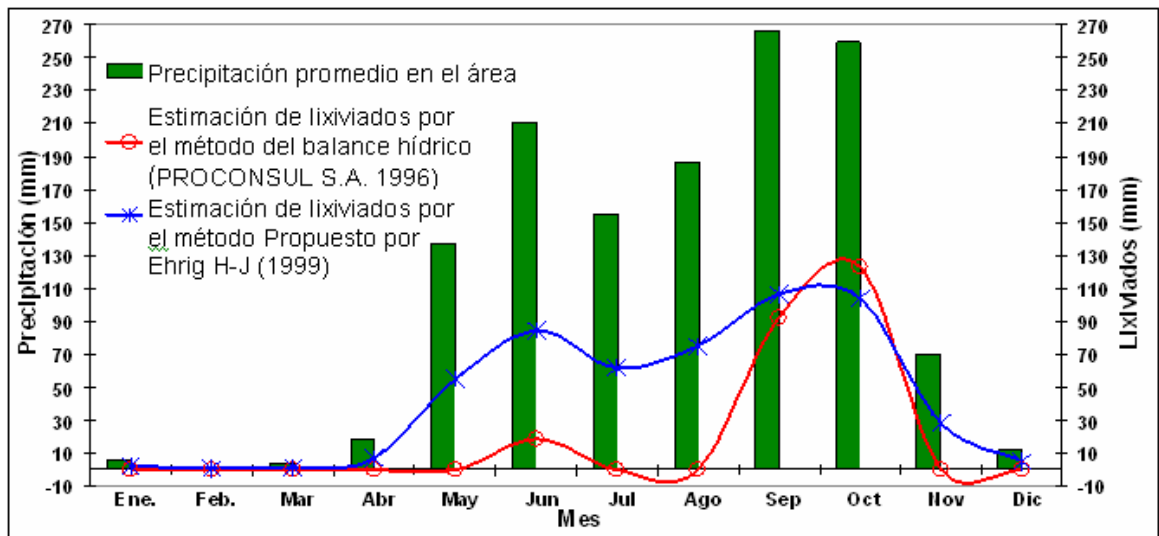


Figura 17. Distribución de la precipitación media mensual y del volumen de lixiviados producidos, estimaciones por el método balance hídrico (CIRA & PROCONSUL S.A., 1995) y aplicación del método propuesto por Ehrig (1999).

La metodología empleada por Ehrig (1999) se deduce de los conocimientos y experiencias adquiridas en estudios de basureros (rellenos) en el que se asocia la cantidad de lixiviados producidos según el tipo de compactación que se hace a la basura, agua que penetra en el basurero proveniente de la precipitación, los procesos bioquímicos y por la propia humedad de la basura. Se asigna un factor de producción de lixiviados correspondiente a 40% del agua de precipitación cuando se trabaja con compactadores de oruga (Bulldózer).

El método del balance hídrico (PROCONSUL, Ingenieros S.A., 1996) permitió estimar un promedio de 234 mm/año de lixiviados que equivale a un volumen de 5,086.65 m<sup>3</sup>/año (13.9 m<sup>3</sup>/día). Con éste método se observa que nueve meses al año se asumen sin producción de líquidos lixiviados cuando las precipitaciones son menores a 190 mm; y solo en junio, septiembre y octubre hay producción de lixiviados (Anexo 1). Mientras que el método propuesto por Ehrig, refleja un promedio de 532.4 mm/año con una generación promedio mensual de 11,573.22 m<sup>3</sup> (31.7 m<sup>3</sup>/día) de lixiviados (Anexo 1), con una producción de lixiviados distribuida a lo largo del año cuyas fluctuaciones están relacionadas con las precipitaciones observadas en el área. Hay una notable diferencia entre ambos métodos, aunque aparentemente el más acertado con respecto a las relaciones

que se dan en el entorno de un basurero y las precipitaciones en el área es el método inferido por Ehrig (1999), ya que considera: a) una producción continua mensual de lixiviados (aunque talvez no en igual proporción de volúmenes generados a lo largo del año); b) el tipo de basura depositada en el basurero; c) el método de compactación de la basura; d) la humedad presente en la basura. Mientras que el método por balance hídrico, únicamente supone el volumen de precipitación en la zona.

#### 4.5.1.2 Transporte de lixiviados

Considerando que el transporte de los compuestos en el agua subterránea se realiza por advección (conducción con las líneas de flujo) y utilizando a los cloruros como iones con carácter conservativo (es decir no son adsorbidos por el medio hidrogeológico) y como un producto de la generación de lixiviados, se puede estimar la velocidad conque un contaminante generado en el basurero viaja hasta la zona de descarga en la costa del Lago Cocibolca (hacia el este del basurero).

Bajo este criterio se utilizó el modelo de una dimensión (Fetter, 1993) de transporte advectivo, el cual considera la cantidad de solución que se transporta como una función de su concentración en el agua del medio hidrogeológico (acuífero) y de la cantidad de agua que se mueve sobre el medio poroso, definida en la ecuación:

$$V_x = K / n_e * dh / dl$$

Donde:

$V_x$ :	velocidad promedio lineal (m/día).
$K$ :	Conductividad hidráulica (m/día).
$n_e$ :	Porosidad efectiva (adimensional).
$dh/dl$ :	Gradiente hidráulico (adimensional).



Para tal efecto y acorde con las características del medio hidrogeológico presente en la zona, se asumió un valor de 5 m/día para la conductividad hidráulica ( $K$ ) y un valor de 0.45 (adimensional) para la porosidad efectiva ( $n_e$ ) correspondiente a material limoso (Appelo & Postma, 1999, Custodio & Llamas, 2001). Estos valores corresponden al límite superior del rango establecido para este tipo de material; debido a que las transmisividades encontradas en la zona indican materiales bastante permeables (Espinoza, M. 1999).

La distancia entre el basurero y el minipiezómetro MP-07 localizado en la zona de descarga es de 4,250 m; el nivel piezométrico a la altura del basurero es de 65 m y en la zona de descarga es de 0.6 m que originan un gradiente hidráulico de  $15.15 \cdot 10^{-3}$  (adimensional).

Con estos valores se estimó que la **velocidad promedio lineal** es de 0.168 m/d lo que implicaría que en 69.30 años, los lixiviados producidos en el basurero y que se mueven por advección estarían arribando a la zona de descarga; esto, considerando un flujo laminar, sin alteraciones producidas por fallas presentes en el acuífero o bombeo excesivo en los campos de pozos de ENACAL (Quinta Ena I y III), que generen conos de abatimiento que alteren las líneas de flujo o que sustraigan dichos contaminantes durante el bombeo, poniendo en riesgo la salud de la población que es abastecida a través de dichos pozos.

Estos resultados son comparables con los obtenidos en un relleno sanitario ubicado en Noruega, emplazado en un delta glacio-fluvial a unos 50 km de Oslo y con un área similar al del basurero La Joya (28,000 m<sup>2</sup>). Se obtuvo un valor de velocidad de transporte de los lixiviados de 0.15 m/d (similar a la obtenida en este estudio). El estudio menciona que la velocidad de transporte de los lixiviados se incrementa cuando hay mayor recarga en el área (Basberg, L. et al., 1998). Es probable que esta situación esté ocurriendo en la zona de Granada durante los meses de junio, septiembre y octubre, cuando ocurren las mayores precipitaciones.

#### 4.5.2 Hidrogeoquímica

La composición química del agua subterránea y de los lixiviados en el área de estudio se presentará primeramente indicando el carácter hidroquímico de las aguas subterráneas, seguido por la evaluación: parámetros de campo, composición físico-química (iones y otros constituyentes), carga de contaminantes ( $\text{DBO}_5$ , DQO, COD, aceites y grasas), y metales pesados.

Los resultados se presentan para ambas campañas de muestreo (verano e invierno), para los 39 pozos muestreados (28 PP y 11 PE; Anexo 2) y los 7 minipiezómetros instalados (Anexo 2, Figura 13).

Los criterios de selección de los pozos monitoreados fueron: a) localización de los pozos (antes y después del basurero y la influencia de los lixiviados); y b) importancia en el uso de los pozos (agua potable -suministro urbano y privado-, abastecimiento local, industrial, etcétera). En cuanto a los minipiezómetros instalados y monitoreados, el principal criterio fue la determinación o posible influencia de los lixiviados en el sitio y/o agua subterránea; de esta manera, se seleccionaron tres puntos en el sitio del basurero, y cuatro sitios cerca de la zona de descarga en la costa del Lago Cocibolca.

##### 4.5.2.1 Carácter hidroquímico de las aguas subterráneas

El agua subterránea de la mayoría de puntos muestreados es del tipo **bicarbonatada-cálcica-sódica**; con ligeras variaciones del ión sodio al magnesio de la época seca a la lluviosa (PP-20, PP-25 y PP-26; Figura 18). Las aguas bicarbonatadas-cálcicas-magnésicas, con predominio del ión bicarbonato, son típicas de zonas de recarga (INETER, 2004). Desde el punto de vista hidroquímico estas agua son relativamente jóvenes y en su mayoría de origen meteórico (precipitación de recién infiltración, con poco tiempo de contacto agua-roca). El intercambio iónico de sodio por magnesio con la estación, es probable que se deba a los efectos de disolución de minerales al darse la infiltración de las

aguas precipitadas en la época lluviosa en esta zona de recarga. Es común que en pozos próximos a áreas de recarga se aprecien variaciones estacionales de la calidad de agua infiltrada, con frecuencia los iones calcio y sodio son más abundantes en las regiones de rocas ígneas (volcánicas); esto por que los minerales cálcicos-sódicos se meteorizan más fácilmente que el magnesio; aunque el magnesio se disuelve más lentamente y tiende a permanecer en solución (Custodio & Llamas, 2001).

Los bicarbonatos presentes en el agua, se derivan en gran parte del dióxido de carbono que ha sido extraído del aire y liberado en el suelo a través de la actividad bioquímica (Hem, D. J., 1989).

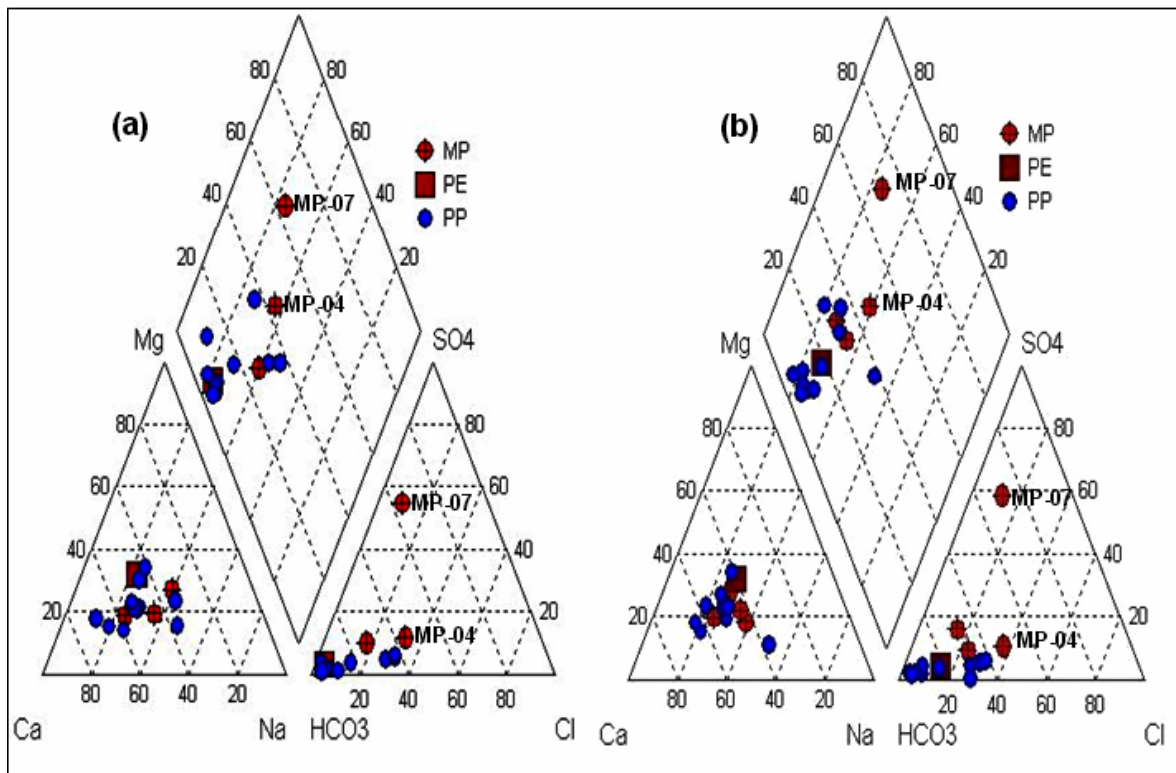


Figura 18. Tipo de agua en el área de estudio clasificada mediante el diagrama de **Piper**, verano (a) e invierno (b).

Los pozos PP-04 (Ena 1) y PP-17 (Escudo 1) propiedad de ENACAL presentan aguas de tipo **bicarbonatadas-sódicas** en ambas épocas, estos dos pozos son profundos y con alta transmisividad (Tabla 4), se encuentran alineados en la dirección de las líneas de flujo que vienen desde el cráter (hoya volcánica adjunto al basurero), el PP-17 esta a unos 1000 m de distancia y el PP- 04 a 2500 m. En este cráter es donde por más de 20 años REPTINIC depositó sus aguas residuales del proceso de curtido de cuero, esta influencia quizás es la que pueda tener preponderancia sobre el predominio del sodio, ya que la curtiembre hace uso de altos contenidos de sales de cloruro de sodio y sulfatos de cromo (iones de carácter conservativo). En este cráter los residuos se almacenaron en una laguna cuya distancia entre el nivel freático y ellos es próxima, probablemente de unos 20 m de separación, lo que significaría menos tiempo para incorporarse al agua subterránea y viajar en el medio hidrogeológico siguiendo las líneas de flujo y a la misma velocidad del agua sin ser absorbidos. El dominio de sales de sodio y cloro (el ión cloruro se mueve en los acuíferos a la misma velocidad que el agua entrante) se debe a la estabilidad de estos iones a través del drenaje subterráneo hacia las zonas bajas o de descarga (Custodio & Llamas, 2001).

Los minipiezómetros ubicados en el basurero presentaron altos contenido de cloruros tanto en verano como en invierno con 1749.8 y 2463.5 mg.l<sup>-1</sup>, respectivamente; por lo tanto se trata de lixiviados con elevada mineralización lo cual es típico de los lixiviados generados en basureros con valores promedios de 2119 mg.l<sup>-1</sup> hasta un máximo de 4953 mg.l<sup>-1</sup> (Ehrig, 1999).

Las aguas cloruradas presentes como sales de calcio, magnesio, sodio y bicarbonato, se deben al intercambio iónico producido por el ascenso de aguas profundas a través de fallas volcánicas, o como aguas típicas de zonas de descarga. No obstante, las aguas cloruradas detectadas en la zona del basurero, la presencia del ión cloruro no obedece a un intercambio iónico de origen natural, sino a las condiciones antropogénicas que alteran la evolución hidrogeoquímica en el agua contenida en los lixiviados.

Los minipiezómetros MP-04 y MP-06 ubicados en la zona de descarga en el litoral del lago a la altura del club náutico y la desembocadura del arroyo Zacatiligüe presentaron aguas **bicarbonatadas-cálcicas-sódicas** con la misma evolución presentada en los pozos muestreados en la parte media y alta de la cuenca; exceptuando el MP-07 que es de tipo **sulfatada-cálcica** (Figura 18) y es el único punto en donde existe la posibilidad de evidencia de la influencia de aportes importantes de los residuos depositados en La Joya (residuos de los procesos óxido-reductores que se llevan a cabo en el basurero) ya que este punto está ubicado en la misma dirección de las líneas de flujo que vienen desde el basurero (Figura 13). Los sulfuros orgánicos pueden oxidarse (convirtiéndose a sulfatos) en procesos naturales de los suelos o en tratamiento de desechos orgánicos (Hem, 1989).

#### **4.5.2.2 Evaluación del agua subterránea y los lixiviados**

##### **4.5.2.2.1 Parámetros de campo**

A los sitios seleccionados para monitoreo químico, se les midió: pH, potencial de oxidación-reducción (Eh), oxígeno disuelto (OD), temperatura, conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de salinidad, y alcalinidad (Anexo 2). Estos parámetros se miden porque ciertas propiedades del agua están influenciadas por la temperatura (pH, OD), y algunas cambian por el contacto con la atmósfera (Eh, OD). Las mediciones de parámetros de campo se realizan para obtener las condiciones actuales de una muestra de agua en un tiempo y circunstancias dadas; lo que representa las condiciones reales y predominantes del acuífero; así, se determinarán condiciones ácidas o básicas, oxidantes o reductoras, aeróbicas o anaeróbicas; y los principales procesos (reacciones) que se están llevando a cabo en el reservorio de agua subterránea.

➤ **pH, potencial de oxidación-reducción ( $E_H$ ) y oxígeno disuelto (OD)**

El pH es considerado una medida del equilibrio ácido–base alcanzado por diversos compuestos disueltos; y es controlado por el sistema de equilibrio de carbonatos ( $\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ ). A valores de pH menores de 9 unidades, el sistema de equilibrio de carbonatos-bicarbonatos, tiende a que los bicarbonatos precipiten en el agua (por lo que un agua tendrá carácter bicarbonatado predominantemente); mientras que a valores de pH mayores de 11 unidades, los carbonatos (e hidróxidos de calcio) serán predominantes en el agua. Asimismo, el pH regula: 1) la mineralización; 2) las formas de vida acuática y bacteriana que pueden sobrevivir en el medio acuático de acuerdo a su tolerancia al pH; y 3) la solubilización y/o precipitación de compuestos inorgánicos, lo que les confiere movilidad en el agua subterránea (como por ejemplo, los metales pesados), al volverlos más solubles cuando el pH disminuye (medio ácido, que propicia que las condiciones reductoras sean las predominantes en el sistema). Estudios han encontrado que la solubilidad de algunos metales como cadmio, es controlada por pH menores a 6.5 y  $E_H$  superiores a 0.2 V (Tarradellas et al., 1996).

Así como el  $E_H$  determina la distribución de todo el equilibrio redox (oxidación-reducción), de manera similar el pH expresa la distribución de todo el equilibrio ácido-base (Appelo, & Postma, 1996). La interrelación entre estos parámetros se debe a que los procesos redox son controlados por el equilibrio ácido–base alcanzado por diversos compuestos disueltos en el agua y por el sistema de equilibrio de carbonatos y bicarbonatos. Tanto el pH como el  $E_H$  son de gran importancia en el medio hidrogeológico ya que ambos controlan la evolución y estabilidad del sistema óxido-reducción (redox), por lo tanto sus mediciones en campo indican la tendencia oxidación-reducción real que se está llevando a cabo en ese instante en el medio hidrogeológico (Fetter, 1999).

El pH se relaciona con el  $E_H$  por las condiciones oxidantes o reductoras (redox) que predominan en un sistema y con el OD por el medio aeróbico (en presencia de oxígeno) o anaeróbico (en ausencia de oxígeno) presentes en el sistema. Se

entiende que a pH ácidos se tienen Eh reductores (valores negativos, o positivos pero muy bajos de Eh) y condiciones anaeróbicas; mientras que a pH básicos, se tienen condiciones oxidantes (Eh positivos o muy positivos) y medios aeróbicos.

Los valores de pH en ambas épocas de muestreo oscilaron de 6.4 a 7.7 en el agua subterránea; mientras que en los lixiviados de 7,0 a 7, 6 (Anexo 2). Ambos rangos se encuentran entre los valores normales encontrados en las aguas naturales (6,5 a 8.5; Custodio & Llamas, 1976), con excepción del valor de 6,4 reportado en invierno en el PP-01, pero que no presenta una amenaza para la salud humana y de de los lixiviados (3.7 a 8.5; Miliarium, 2004; Ehrig, 1999). Las mediciones de pH realizadas en el campo no variaron con respecto a las medidas en el laboratorio (Anexo 2).

Los valores de pH medidos a las aguas subterráneas, les confieren la suficiente capacidad para actuar como tampón (o buffer) en el sistema acuífero; ya que la mayoría de estas aguas tienen una tendencia predominante hacia la neutralidad (por lo que no hay una preferencia hacia un estado ácido o básico dominante en el sistema), regulando de esta manera los posibles cambios bruscos en el pH de las aguas, cuando un contaminante (ácido o básico) es añadido en las aguas subterráneas.

Las aguas “ácidas” (bajos valores de pH) no representan una amenaza para la salud humana. No obstante, no son recomendadas debido a la corrosión que producen en las tuberías de suministro de agua potable y en los sistemas de enfriamiento y calefacción; además de los daños que producen en la vida acuática (los peces soportan valores de pH entre 5.0 y 9.5 unidades; Custodio & Llamas, 2001).

Las aguas “básicas” (altos valores de pH) en las aguas naturales crean dificultades en las plantas (Custodio & Llamas, 2001), y pueden contener una cantidad considerable de carbonatos. En este caso, con el rango de valores de pH presentes en las aguas subterráneas, se espera que las aguas contengan una

cantidad considerable de bicarbonatos, y no de carbonatos; como se puede apreciar en la Figura 19.

Para los valores de pH reportados para los lixiviados (están dentro de los rangos determinados), se puede observar que son valores correspondientes al rango de la neutralidad, con tendencia hacia la basicidad, por lo que se puede considerar que las condiciones que podrían prevalecer en el sistema son las oxidantes.

El Eh obtenido en el agua subterránea osciló entre los 0.03 a 0.71 V en verano y entre -0.14 a 0.87 V en invierno. Los valores obtenidos en los lixiviados oscilan entre 0.05 a 0.20 V en verano e invierno. El valor de -0.14 V reportado para el PE-11 presenta las mayores condiciones reductoras en el acuífero; seguido por el valor de -0.05 V para el MP-07. El PE-11 se encuentra afectado por desechos de murciélagos (pozo sin protección) depositados directamente sobre las aguas subterráneas provocando el consumo del oxígeno disuelto presente en el agua y generando condiciones reductoras. El MP-07 se localiza en las líneas de flujo provenientes del basurero, por lo que el valor de Eh obtenido, podría reflejar parte de las condiciones reductoras que existen en el basurero o en puntos afectados por elevada carga orgánica.

El rango de Eh presentes tanto en aguas subterráneas como en los lixiviados, al parecer mantiene las condiciones favorables con pH ligeramente neutros para una descomposición eficiente por las bacterias de la materia orgánica, posterior a ello se generan condiciones anaeróbicas y medios reducidos (Appelo & Postma, 1994). Se debe considerar que las medidas de pH se realizaron en lixiviados superficiales (minipiezómetros de 2 a 3 metros de profundidad sobre el basurero) por tanto la basura en estos niveles es reciente e inicia con los procesos de descomposición aeróbica hasta que haya agotación de oxígeno para pasar a la descomposición anaeróbica (fermentación ácida) donde los valores de pH al ser medidos son ácidos.

La Figura 19 muestra la distribución de valores de pH vs. Eh obtenidos en los puntos muestreados; en pH menores a 7 domina la condición reducida y en



mayores a 7 oxidada, lo mismo para el Eh, valores positivos condición oxidada y valores negativos reducida. En verano se observan 3 zonas de comportamientos de las aguas subterráneas: **reducido, intermedio y oxidado** (comportamiento típico en la zonificación que se dan en basureros donde se depositan altos contenidos de materia orgánica). En la primera zona se presentan condiciones reducidas, en donde el mayor valor se muestra en los lixiviados del basurero (MP-03); seguida por el MP-07 ubicado en la zona cercana a la costa del Lago Cocibolca donde descarga el agua subterránea y en el pozo PP-08 (San Agustín, el mas cercano al basurero) que está ubicado a unos 1000 metros al Este del basurero. Tanto el pozo como el minipiezómetro MP-07 se alinean en la misma dirección de las líneas de flujo que pasan por el basurero. En la segunda zona se agrupan la mayoría de pozos excavados y perforados al igual que los minipiezómetros MP-04, MP-05 y MP-06, todos ellos se encuentran alejados de la trayectoria que toman las líneas de flujo que pasan por basurero en dirección al lago, en ellos predomina una condición redox intermedia. En la tercera zona, con ambiente más oxidado, están presentes los pozos PP-02 (Hacienda Quinta Ena) y PP-03 (ENACAL), situados al costado Este del cerro Posintepe, el cual podría estar brindándole una barrera a las líneas de flujo que vienen desde el basurero.

En la Figura 20 (Fetter, 1999), se observa la idealización de una estela de lixiviados y la zonificación geoquímica que se presenta en un acuífero, la que coincide con la distribución de los pozos muestreados, mientras más cercanos al sitio del vertedero dominan las condiciones reductoras y alejados dominan los ambientes oxidados (aeróbico).

En invierno hay una distribución más dispersa de las condiciones redox en los puntos muestreados (Figura 19), por lo que es difícil determinar una tendencia en el acuífero, debido a que los sistemas naturales rara vez están en equilibrio (Suthersan, S. 1997). No obstante, se pudo observar que los pozos PP-02 y PP-03 están en condiciones oxidadas, las que pueden ser atribuidas a la oxigenación provocada por el disturbio ocasionado por el bombeo a que están sometidos estos pozos, el primero es usado en una lechería y el segundo para agua potable.

En cuanto al oxígeno disuelto presente en las aguas subterráneas, en su mayoría presentaron valores entre 3 y 7  $\text{mg.l}^{-1}$ , para verano e invierno (Anexo 2). Las concentraciones de oxígeno comúnmente medidas en aguas subterráneas, con frecuencia son menores a 2  $\text{mg.l}^{-1}$ ; aunque Custodio & Llamas (2001) establecen un valor de 0 a 5  $\text{mg.l}^{-1}$ . Estos valores medidos, principalmente en los pozos perforados para suministro de agua potable, pueden haber sido inducidos debido al bombeo continuo en los pozos de ENACAL.

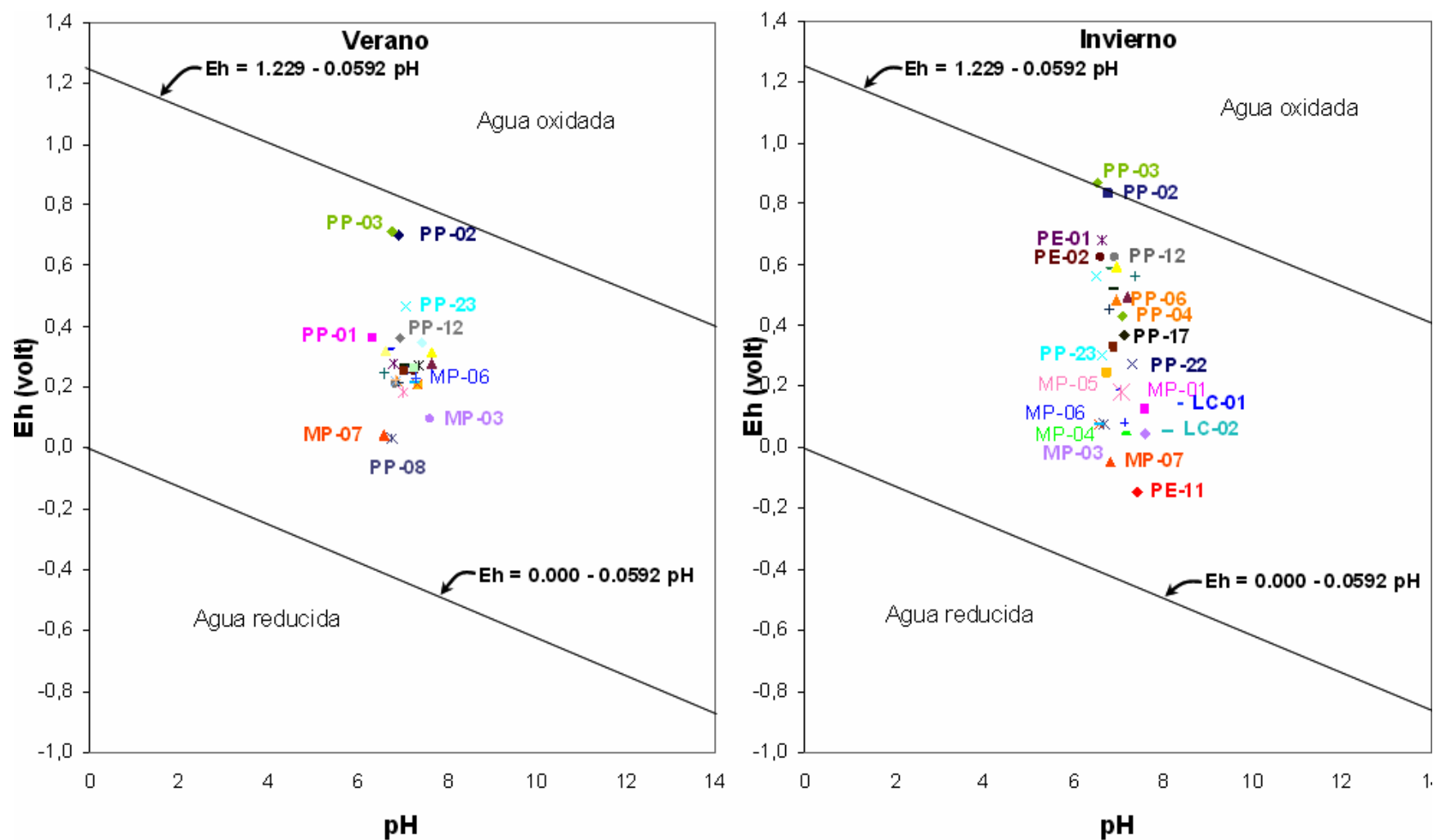


Figura 19 Diagrama de pH – Eh presentando la tendencia oxido reducción de los puntos muestreados.

En el minipiezómetro MP-03 ubicado en el basurero se encontraron las concentraciones más bajas ( $0.5$  y  $0.3 \text{ mg.l}^{-1}$  de oxígeno para verano e invierno, respectivamente). Esto es de esperarse porque hay consumo de oxígeno en los procesos de degradación de la basura por la actividad de los microorganismos (Custodio & Llamas, 2001). En invierno las concentraciones son menores que en verano, debido quizás a la influencia de valores altos de Eh y de material orgánico (aumento en la demanda requerida para los procesos metabólicos de las bacterias aeróbicas ya que en esta época hay mayor producción de lixiviados y por ende mayor actividad bacteriana; Ehrig, 1999).

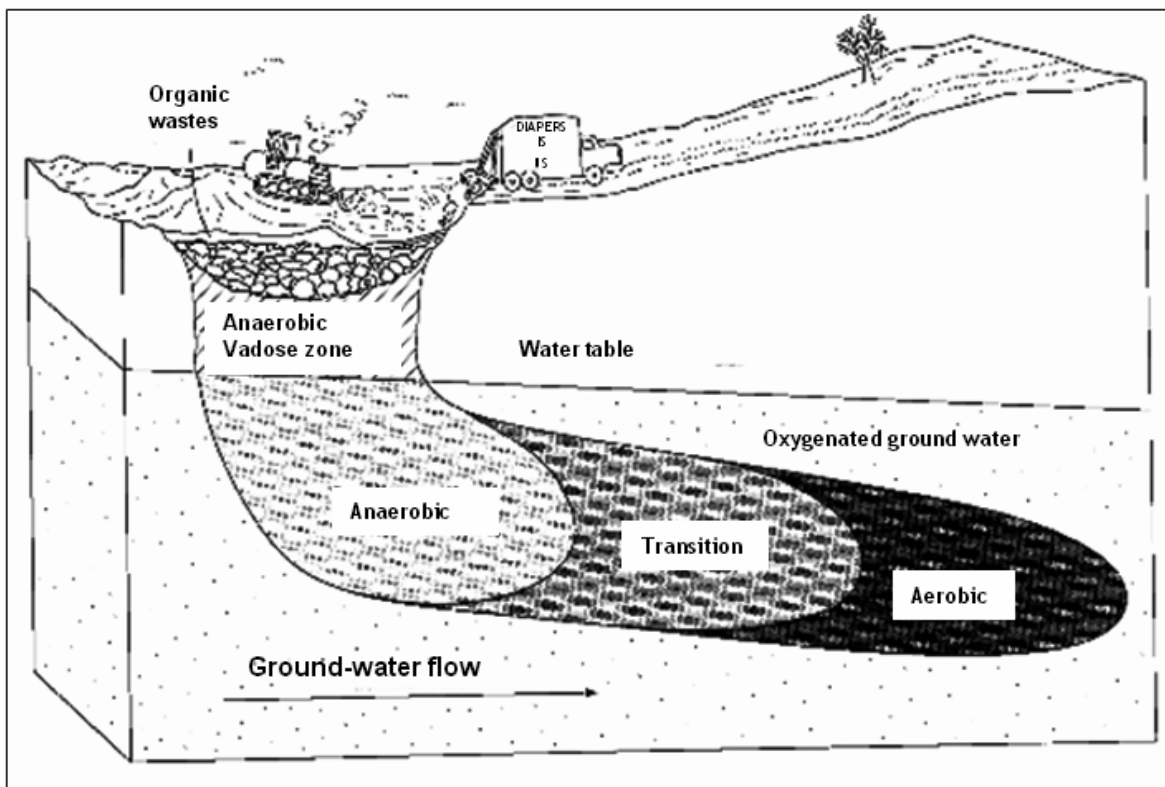


Figura 20. Zonificación geoquímica de la estela de contaminación en un basurero de alto contenido orgánico (FETTER, 1999; modificado).

➤ **Temperatura**

La temperatura medida en el agua subterránea osciló entre los 29 a 33° C en verano. En invierno se observó una leve disminución de esta temperatura (desde pocas décimas hasta 1° C). Estas temperaturas son por lo general el reflejo de la temperatura media anual del lugar, la cual no tiene variaciones tan grandes de la época de verano a la de invierno. No obstante, temperaturas por arriba de los 30° C no son recomendables para consumo humano.

La temperatura promedio en los lixiviados fue de 34° C en verano y 32° C en invierno, las temperaturas imperantes en los lixiviados de los basureros, generalmente están comprendidas entre 25° y 40° C, estas temperaturas pueden existir sin ningún problema, independientemente de las temperaturas existentes en el exterior del relleno (Ehrig, 1999).

➤ **Conductividad eléctrica**

Los valores de conductividad medidos en el agua subterránea en verano oscilaron entre 175.3 a 550.0  $\mu\text{Scm}^{-1}$  y en invierno de 175.9 a 908  $\mu\text{Scm}^{-1}$ , pueden ser considerados comunes en las aguas subterráneas de esta zona (Anexo 2), ya que naturalmente varían de 100 a 2000  $\mu\text{Scm}^{-1}$  considerándose como agua dulce (Custodio & Llamas, 1976). Los mayores valores de conductividad eléctrica reportados en ambas estaciones, corresponden al PE-01; es probable que esto se deba a los sólidos suspendidos en el agua o a la turbidez ya que es un pozo somero (NEA de 1.5 m) y con influencia de ganado vacuno en su alrededor.

En los lixiviados, la conductividad eléctrica osciló entre 11,690 y 14,990  $\mu\text{Scm}^{-1}$  en verano (promedio de 13,340  $\mu\text{Scm}^{-1}$ ) y entre 9,850 a 11,410  $\mu\text{Scm}^{-1}$  en invierno (promedio de 10,630  $\mu\text{Scm}^{-1}$ ). Estas mediciones están dentro de los valores comunes encontrados en lixiviados de basureros (Ehrig, 1999).

Para los minipiezómetros instalados próximos al Lago Cocibolca, los valores fueron de 421 – 1,454  $\mu\text{Scm}^{-1}$  en verano y de 397- 1,335  $\mu\text{Scm}^{-1}$  en invierno; en donde los máximos valores los presentan MP-04 y MP-07, localizados en la parte

baja de la subcuenca y en la misma dirección del basurero. Es probable que haya una alteración de iones disueltos que afectan la conductividad eléctrica, ya que ambos puntos son zonas de descarga y están afectadas por dos arroyos. El MP-04 por el arroyo Zacatiligüe que tiene afluencia de agua residuales domésticas de forma permanente, las que podrían infiltrarse y distribuirse por el área; y el MP-07 por un arroyo que baja desde la comarca Tepeyac pasando por el barrio Posintepe, donde la población dispone sus aguas residuales que luego logran llegar al área cercana a la ubicación de este minipiezómetro.

Hay una relación directa entre la conductividad y la salinidad, ya que la salinidad es consecuencia de iones disueltos que a la vez determinan los valores de la conductividad. Estos parámetros están condicionados principalmente por los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  que tienen movilidad advectiva, por consiguiente si estos son liberados del medio geológico o bien como residuos lixiviados de un basurero tienden a moverse con el agua subterránea, indicando ruta y movimiento de la misma. En muchos casos son usados como trazadores aprovechando ésta característica (Custodio & Llamas, 1976).

Considerando estas circunstancias se puede suponer que los valores altos de conductividad y salinidad medidos en los dos minipiezómetros ubicados en la zona de descarga son producto de las altas concentraciones de cloruros producidas y transportadas en los lixiviados de el basurero La Joya (Figura 13), ya sea a través de la migración en el medio hidrogeológico o el escurrimiento superficial facilitado por la textura y pendiente del suelo así como la dirección del flujo superficial que viene a descargar a la zona del Lago Cocibolca.

➤ **Alcalinidad total**

La alcalinidad en los puntos muestreados es la típica encontrada en las aguas subterráneas, que por lo general oscilan entre 100 y 300 mg.l<sup>-1</sup>. En verano, los valores medidos estuvieron entre 54 y 222 mg.l<sup>-1</sup> como CaCO<sub>3</sub> y 83 a 308 mg.l<sup>-1</sup> como CaCO<sub>3</sub>, en invierno. La infiltración de CO<sub>2</sub> gaseoso en la atmósfera es la principal fuente de carbonatos en agua superficial y subterránea; pero también la reducción biológica de sulfatos es una fuente local de CO<sub>2</sub> gaseoso en el suelo.

Es oportuno destacar que los valores medidos en la época lluviosa en pozos y minipiezómetros son mayores que las medidas en verano, quizás estas diferencias se deban a las influencias que puedan estar ejerciendo iones como la sílice disuelta, fosfatos, boratos, fluoruros; y en algunos casos arsenatos, aluminatos, hidróxidos de hierro y compuestos orgánicos presentes en el medio hidrogeológico (Custodio & Llamas, 1976).

**4.5.2.2 Composición físico-química del agua subterránea y los lixiviados**

En esta sección se obtendrá una visión de las características del agua subterránea en el momento de la captación de la muestra, las cuales son producto de su paso a través del medio hidrogeológico o bien de posibles alteraciones que podrían ser atribuidas a las actividades antropogénicas. Esta visión, servirá como precedente de futuras investigaciones en el aprovechamiento del acuífero de Granada.

Los resultados analíticos de todos los puntos muestreados se presentan en el Anexo 2. En esta sección, se detallarán las características monitoreadas en los puntos para ambas épocas (Tabla 8 a y 8 b); las cuales se presentan a continuación.

**Tabla 8. a) Parámetros Físico – Químicos en Granada de los puntos muestreados en ambas épocas de muestreo (Abril – Octubre, 2004).**

Código	Nombre LD LMA Punto/Epoca	pH Unidad de pH 0.1 - 14 6.5 - 8.5		CE ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ ) 0,01 400		S. T. D. ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) - 1000		Turbidez (UNT) 0,00 5		C.V ( $\text{mg.l}^{-1}\text{Pt-Co}$ ) 5 - 70 15		Dureza Total ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,13 500		Alc. T. ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,62 -	
		Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-02	Hda. Quinta Ena	7,2	7,4	346	353	289,82	295,08	5,82	14,35	<LD	5,0	125,5	126,0	146,60	144,90
PP-04	Quinta Ena 1	7,2	7,9	500	488	336,00	362,45	0,33	0,24	<LD	5,0	159,0	164,8	155,25	159,60
PP-05	Quinta Ena 2	7,1	7,1	531	555	404,09	408,62	0,21	0,26	<LD	<LD	189,7	195,9	154,80	155,40
PP-12	Bo. Pantanal	7,1	7,4	313	294	255,63	257,57	0,24	0,36	<LD	5,0	114,6	111,0	143,61	143,85
PP-17	Escudo 1	7,7	7,9	536	504	361,89	385,50	0,28	0,37	<LD	5,0	126,4	125,4	153,90	159,60
PP-20	Félix Pérez	7,8	7,8	327	337	247,57	271,86	0,32	0,71	<LD	5,0	124,5	133,0	137,25	155,40
PP-22	Policia	7,7	7,9	331	297	260,68	274,34	1,75	0,38	<LD	5,0	131,9	131,3	150,84	158,55
PP-23	Sistema Penitenciario	7,2	7,3	349	329	283,13	287,59	0,36	0,29	<LD	5,0	115,1	115,6	141,55	149,10
PP-25	La Chanchera	7,7	7,5	266	271	214,41	241,71	0,62	1,63	<LD	5,0	98,8	101,0	120,65	115,50
PP-26	Tepeyac	6,4	7,7	277	265	237,98	246,28	1,43	0,33	<LD	5,0	100,4	101,0	125,25	133,40
MP-03	Basurero	-	-	-	-	7754,00	8478,00	-	-	-	-	-	-	-	-
MP-04	Zona de descarga	7,1	7,7	1196	1591	743,29	1057,00	3,71	6,07	10,0	25,0	361,0	542,0	317,05	474,65
MP-06	Zona de descarga	7,6	7,7	478	389	312,52	310,50	4,46	44,10	<LD	20,0	134,0	156,3	159,00	134,40
MP-07	Zona de descarga	6,9	7,1	1660	1474	1284,31	1244,00	194,80	112,20	250,0	100,0	676,0	689,3	372,50	258,35

Código	Nombre LD LMA Punto/Epoca	$\text{Ca}^{+2}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,08 100		$\text{Mg}^{+2}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,20 50		$\text{K}^{+}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,10 10		$\text{Na}^{+}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,18 200		$\text{Cl}^{-}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,25 250		$\text{SO}_4^{-2}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,25 250		$\text{HCO}_3^{-}$ ( $\text{mg.l}^{-1}$ ) 0,75 -	
		Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-02	Hda. Quinta Ena	35,1	35,3	9,2	9,2	6,28	6,11	23,05	23,10	17,8	18,1	5,9	6,6	178,9	176,8
PP-04	Quinta Ena 1	23,6	47,7	9,9	11,1	7,25	7,31	34,10	32,60	45,3	42,8	10,5	10,4	189,5	194,8
PP-05	Quinta Ena 2	54,3	53,4	13,2	14,5	6,83	7,02	31,70	32,80	54,8	51,0	12,7	12,5	188,9	189,7
PP-12	Bo. Pantanal	31,7	29,7	8,6	9,0	4,42	4,52	17,38	18,60	7,3	7,3	2,6	3,8	175,2	175,6
PP-17	Escudo 1	35,6	38,8	9,1	6,9	11,22	11,42	52,10	61,50	53,8	59,2	14,8	15,0	187,9	194,8
PP-20	Félix Pérez	39,6	42,9	6,2	6,3	4,77	4,42	8,50	16,80	11,1	10,0	1,6	3,0	167,5	189,7
PP-22	Policia	42,8	41,0	6,1	7,1	4,27	4,32	14,45	13,40	3,9	3,6	3,2	3,9	184,1	193,5
PP-23	Sistema Penitenciario	42,8	31,1	6,1	9,2	6,01	6,01	21,28	21,70	2,1	8,6	5,9	6,9	172,7	182,0
PP-25	La Chanchera	23,8	26,1	9,6	8,8	4,27	4,42	14,52	14,60	4,3	4,6	2,4	2,9	147,2	141,0
PP-26	Tepeyac	21,9	22,0	11,1	11,2	5,05	5,02	15,32	15,20	3,4	4,3	1,3	2,2	152,8	164,0
MP-03	Basurero	-	-	-	-	-	-	-	-	1749,8	2463,5	56,2	53,5	-	-
MP-04	Zona de descarga	101,0	152,6	26,5	39,2	13,30	13,46	93,40	157,00	131,1	236,6	63,2	91,2	386,9	579,2
MP-06	Zona de descarga	29,7	38,5	14,6	14,7	7,54	5,34	40,20	27,00	27,2	21,9	21,2	30,2	194,0	164,0
MP-07	Zona de descarga	203,2	203,7	41,1	44,0	8,74	5,34	100,20	105,00	72,0	80,1	550,2	504,2	454,7	315,2

PP Pozo perforado  
MP Minipiezómetro  
ND No detectado  
- No analizado

<LD Menor que el límite de detección  
LD Límite de detección del método  
LMA Límite máximo admitido (CAPRE, 1994)  
CE Conductividad eléctrica

UNT Unidades nefelométricas  
S.T.D. Sólidos Totales Disueltos  
C.V. Color Verdadero  
Alc. T Alcalinidad Total



Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en Granada

Tabla 8. b) Parámetros Físico – Químicos en Granada puntos muestreados en ambas épocas de muestreo (Abril – Octubre, 2004).

Código	Nombre	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		Fe <sup>Total</sup>		Si		F <sup>-</sup>		B	
		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )	
		LD		0,003		0,005		0,04		0,20		0,30		0,02	
		LMA		3		0,5		0,3		-		0,7		0,750	
	Punto/Epoca	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-02	Hda. Quinta Ena	10,1	11,2	<LD	<LD	0,507	0,017	0,9	2,1	94,0	98,5	0,29	0,17	0,32	0,28
PP-04	Quinta Ena1	20,1	22,2	<LD	<LD	0,097	0,040	<LD	<LD	91,8	92,5	0,24	0,06	0,62	1,03
PP-05	Quinta Ena2	44,4	47,0	<LD	<LD	0,095	0,024	<LD	<LD	93,0	97,0	0,25	0,12	0,66	0,56
PP-12	Bo. Pantanal	4,2	4,4	<LD	<LD	0,028	0,064	<LD	<LD	93,0	93,8	0,26	0,21		0,19
PP-17	Escudo 1	5,7	7,9	<LD	<LD	<LD	0,040	<LD	<LD	87,0	88,9	0,30	0,07	1,23	0,12
PP-20	Félix Pérez	9,1	9,8	<LD	<LD	<LD	0,024	<LD	<LD	84,1	85,3	0,25	0,15	0,13	0,17
PP-22	Policía	7,9	8,4	<LD	<LD	0,009	0,050	0,1	<LD	87,4	97,4	0,28	0,09	0,13	0,78
PP-23	Sistema Penitenciario	13,9	13,1	<LD	<LD	0,036	0,040	<LD	<LD	99,9	101,4	0,31	0,12	0,13	0,12
PP-25	La Chanchera	17,7	19,1	<LD	<LD	0,012	0,124	<LD	0,2	65,0	91,6	0,47	0,36	0,12	0,09
PP-26	Tepeyac	5,6	5,6	<LD	<LD	0,147	0,021	0,1	<LD	98,8	100,4	0,35	0,31	0,16	0,19
MP-03	Basurero	310,0	28,6	ND	ND	154,530	-	ND	-	-	-	-	-	-	-
MP-04	Zona de descarga	29,8	7,1	0,440	0,256	0,148	0,066	0,2	0,7	94,6	98,0	0,31	0,14	-	1,42
MP-06	Zona de descarga	7,5	19,8	0,289	0,214	0,095	0,041	0,2	5,6	68,9	88,8	0,40	0,18		0,35
MP-07	Zona de descarga	<LD	<LD	0,011	<LD	0,989	0,685	23,0	15,8	84,7	80,9	0,70	0,52		0,95

Código	Nombre	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>		*COD		DBO <sub>5</sub>		DQO		Ac.&Gr.		Fenol	
		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )	
		LD		0,35		1		10		-		0,005	
		LMA		-		-		-		-		0,002	
	Punto/Epoca	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-02	Hda. Quinta Ena	0,3	0,3	0,72	1,67	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-04	Quinta Ena1	0,2	0,2	1,18	0,61	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-05	Quinta Ena2	0,3	0,3	1,17	1,15	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-12	Bo. Pantanal	0,3	0,3	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-17	Escudo 1	0,1	0,1	<LD	0,98	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-20	Félix Pérez	0,1	0,1	<LD	0,66	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-22	Policía	0,1	0,1	0,85	0,71	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-23	Sistema Penitenciario	0,2	0,2	0,68	0,94	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-25	La Chanchera	0,2	0,2	2,69	0,88	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
PP-26	Tepeyac	0,1	0,6	1,61	0,41	-	-	-	-	-	-	<LD	<LD
MP-03	Basurero	ND	<LD	3057,03	3294,61	373,06	210,48	2000	1515,66	111,50	6,00	<LD	0,025
MP-04	Zona de descarga	0,2	0,2	12,26	25,41	-	1,65	-	19,20	-	0,30	<LD	<LD
MP-06	Zona de descarga	0,3	0,2	6,83	13,03	-	1,13	-	9,60	-	0,00	<LD	<LD
MP-07	Zona de descarga	<LD	0,0	363,51	222,48	-	3,3	-	67,14	-	6,90	0,040	<LD

PP Pozo perforado

MP Minipiezómetro

ND No detectado

- No analizado

COD Carbono Orgánico Disuelto (incluye factor de corrección 2.7205 aplicados a los resultados de UV para el análisis del COD)

<LD Menor que el límite de detección

LD Límite de detección del método

DBO<sub>5</sub> Demanda bioquímica de oxígeno

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE, 1994)

DQO Demanda Química de oxígeno

Ac.&Gr. Aceites y Grasas

➤ **pH**

El pH medido en el laboratorio (Tabla 8 a) no difiere al medido en el campo (Anexo 2) tanto en el agua subterránea como en los lixiviados. En ambas mediciones se encontraron valores normales para las aguas naturales que normalmente oscilan entre los 6.5 a 8.5 (Custodio & Llamas, 1976) y para los lixiviados que van desde los 3.7 a 8.5 (Miliarium, 2004; Ehrig, 1999).

Al parecer los valores de pH medidos no representan una limitante que permitan mantener condiciones desfavorables para que las bacterias efectúen la descomposición de la materia orgánica que pueda estar presente en el agua subterránea o en los lixiviados (Appelo & Postma, 1994).

➤ **Conductividad eléctrica (CE)**

La **CE** eléctrica presente en las muestras de agua subterránea tomadas en pozos de uso particular es menor de  $400 \mu\text{Scm}^{-1}$  valor considerado por la norma CAPRE como el máximo admitido para agua potable, estos oscilaron entre 266 y  $349 \mu\text{Scm}^{-1}$  para la época seca y 265 a  $353 \mu\text{Scm}^{-1}$  en la lluviosa (Tabla 8 a). En los pozos propiedad de ENACAL (PP-04, PP-05 y PP-17) utilizados para el abastecimiento de agua potable a la población los valores sobrepasan el máximo admisible por la norma en ambas épocas de muestreo, al igual que los minipiezómetros ubicados en el área de descarga sobresaliendo el MP-04 y MP-07 con valores cercanos a los  $1,500 \mu\text{Scm}^{-1}$ , el MP-06 al estar más alejado de la influencia de las líneas de flujo y de los arroyos que vienen desde la parte alta del basurero, presentó valores alrededor o ligeramente arriba de los  $400 \mu\text{Scm}^{-1}$ .

Éstas conductividades en el agua subterránea se asocian a los iones disueltos presentes tales como:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , y  $\text{Ca}^{+2}$ , los que pueden agruparse y tratarse como sólidos totales disueltos (STD). En ambos casos las concentraciones fueron altas en los puntos donde se midieron conductividades altas.

El agua natural no contaminada puede tener una conductividad comprendida entre 50 y 500  $\mu\text{Scm}^{-1}$ . Las naturales mineralizadas entre 500 y 1000  $\mu\text{Scm}^{-1}$  incluso podrían reportarse valores hasta de 2000  $\mu\text{Scm}^{-1}$  y reportarse como aguas dulces (Custodio & Llamas 2001; OPS, 1987; Mesa, 2003).

Las líneas de igual conductividad (isovalores) muestran contrastes (Figura 21), altos en el sector del basurero con gradientes marcados hacia el sector de los minipiezómetros instalados en la zona de descarga. Esto es una probable evidencia que su distribución podría estar relacionada con los lixiviados que viajan hacia la zona de descarga del agua subterránea.

Los pozos de ENACAL ubicados en el sector norte-noroeste del basurero: PP-04, PP-05 y PP-17 (El Escudo y Quinta Ena) son los de mayor explotación y con más profundidad en el área (91 m los del sector de Quinta Ena y 152 m los del Escudo). En ellos se aprecian mayores conductividades en comparación a los pozos de uso particular y de menor profundidad, estas características podrían ser resultado de la influencia de las aguas de la laguna de Apoyo, que llegan siguiendo la misma dirección de las líneas de flujo, como es el caso del PP-17 de ENACAL con valores superiores a los 500  $\mu\text{Scm}^{-1}$  tanto en verano como en invierno.

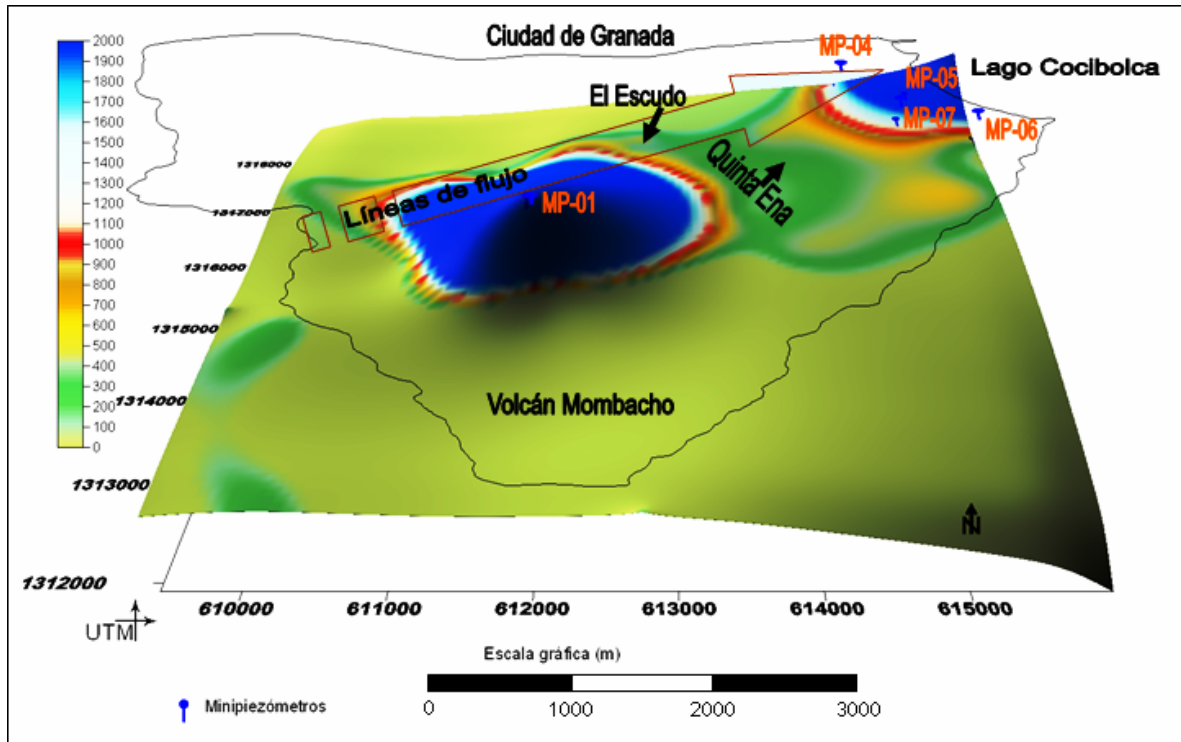


Figura 21. Distribución espacial de las conductividades ( $\mu\text{S}/\text{cm}^1$ ) en el área del basurero y parte de la cuenca hidrogeológica de Granada

### ➤ Sólidos totales disueltos (STD)

Los sólidos totales disueltos (STD) en el agua subterránea de los pozos perforados ( $214.4 - 408.6 \text{ mg.l}^{-1}$ ) se encuentran en concentraciones menores a  $500 \text{ mg.l}^{-1}$ , los cuales son bajos en referencia a los límites máximos admitidos por las normas de calidad de agua potable de  $1000 \text{ mg.l}^{-1}$  (CAPRE, 1994). Mientras que en la zona de descarga, los minipiezómetros reportaron valores de 312 a  $1,284.3 \text{ mg.l}^{-1}$  en verano y de  $310.0 - 1,244.0 \text{ mg.l}^{-1}$  para el invierno, sobrepasando la norma (MP-04 en verano con  $1284.31 \text{ mg.l}^{-1}$  y MP-07 en ambas épocas). El MP-06 al estar más alejado de la zona que ha venido mostrando la posible influencia de lixiviados, presentó los menores valores tanto en verano como en invierno (Tabla 8 a).

Los altos valores de STD encontrados en el MP-07 en ambas épocas de muestreo coinciden con las concentraciones de iones analizados, conductividad y turbidez encontradas en los mismos puntos. Estos elementos podrían estar siendo incorporados por la lixiviación de minerales del material geológico por donde están fluyendo las sustancias húmicas que bajan desde el basurero, si tomamos en cuenta la coincidencia con las líneas de flujo que bajan desde el basurero al igual que la escorrentía superficial.

En el MP-03 (ubicado en el basurero) los valores son altos para ambas épocas (7,754 mg.l<sup>-1</sup> y 8,478 mg.l<sup>-1</sup>, respectivamente). El aumento en la concentración de STD en invierno es de esperarse por la mayor lixiviación de materiales con las lluvias, aumentando con ello la concentración de sustancias disueltas y a la vez el caudal de los lixiviados producidos. Estos valores son comunes en lixiviados; en muchos casos, las concentraciones encontradas están en el rango típico de los 2,180 y 25,873 mg.l<sup>-1</sup> (Fetter, 1999).

Los STD en su mayor parte están compuestos por pequeñas cantidades de materia orgánica y sales inorgánicas entre ellas HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>+2</sup>, y Ca<sup>+2</sup>, los que influyen en el sabor, dureza, propiedades corrosivas e incrustación. Su ocurrencia es debido a efluentes de aguas servidas urbanas, descargas industriales, procesos de lixiviación de minerales del medio geológico. Los efectos relevantes de los sólidos en el agua es el sabor si se presentan en altas concentraciones, y otorgan un sabor insípido en niveles extremadamente bajos; de ahí surge que cuando hay menos de 300 mg.l<sup>-1</sup> se consideran aguas de un excelente estado para el consumo humano, e inaceptables a mayores de 1,200 mg.l<sup>-1</sup> (OPS, 1987).

#### ➤ **Turbidez**

En ambas épocas los valores de turbidez en los pozos y minipiezómetros muestreados fueron menores que el máximo admitido por la norma CAPRE de 5 UNT (unidades nefelométricas), exceptuando el PP-02 (5.8 y 14.4 UNT, respectivamente), MP-04 y MP-06 (con 6.1 y 44.1 UNT, respectivamente; ambos

en invierno) y el MP-07 con 194.8 y 112.2 UNT en verano e invierno respectivamente (Tabla 8 a).

En los minipiezómetros ubicados en el basurero no se realizó esta medición por interferencias de la coloración de los lixiviados en el análisis.

Probablemente los valores altos presentados en los minipiezómetros y pozos sean ocasionados por la presencia de materiales húmicos que están llegando al área a través del flujo subterráneo en verano e invierno, aunque en la época lluviosa puede ser mayor la influencia por la escorrentía superficial que también influye en esta área. Estas sustancias húmicas estarían haciendo disponible otros elementos en el agua, tales como aluminio, hierro y manganeso, que también se presentaron con altas concentraciones en el MP-07.

#### ➤ **Color verdadero**

Los valores de color verdadero para la época seca en los pozos perforados de la zona, fueron menores que el límite de detección del método analítico (5 a 70  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de Pt-Co) con excepción del MP-04 que presentó 10  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de Pt-Co y el MP-07 con 250  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de Pt-Co.

En invierno todos los pozos muestreados reflejaron aumento sin llegar a superar el límite inferior de detección y sin sobrepasar los valores guías de la norma CAPRE de 15  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de Pt-Co (Tabla 8 a). De igual manera, los valores de color verdadero aumentaron en el agua subterránea de la zona de descarga ya que en los tres minipiezómetros (4, 6 y 7) se sobrepasaron los valores de la norma (25, 20 y 100  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de Pt-Co, respectivamente).

Es probable que los valores medidos en los minipiezómetros se deban a la presencia de materiales orgánicos y desechos que fueron incorporados al agua por las actividades antropogénicas ya que en estos puntos presentaron altos valores de hierro y manganeso.

➤ **Alcalinidad**

Los valores de alcalinidad medidos en el agua de los pozos oscilaron entre los 115 y los 160  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  como  $\text{CaCO}_3$ ; que son valores típicos para las aguas subterráneas (Tabla 8 a). En los minipiezómetros instalados en las zonas de descarga, las concentraciones se incrementaron por arriba de los 300  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  como  $\text{CaCO}_3$  en MP-04 y MP-07 (únicamente en verano). MP-06 presentó valores dentro del rango de las concentraciones reportadas para los pozos perforados.

➤ **Dureza**

El rango de dureza total en las aguas subterráneas de los pozos monitoreados, oscila entre 98.8 a 195.9  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , tanto para verano como invierno. Los mínimos y máximos valores se reportan en los pozos PP-04 y PP-05, respectivamente (Tabla 8 a). La clasificación de Durfor and Becker (1964; en Hem, 1989; Tabla 9) describe a estas aguas de moderadamente duras a muy duras. De acuerdo a la Asociación Americana de Trabajos de Agua, un agua “ideal” no debe contener más de 80  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de dureza (Hem, 1989).

Tabla 9. Clasificación de las Aguas según las concentraciones de dureza (Hem, 1989).

Rango de Dureza ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ $\text{CaCO}_3$ )	Descripción
0 – 60	Suaves
61 – 120	Moderadamente duras
121 – 180	Duras
Más de 180	Muy duras

En los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga, los valores de dureza se incrementan considerablemente para MP-04 y MP-07, con respecto a los reportados en los pozos del área; clasificando a sus aguas como muy duras. En MP-04 la dureza se incrementa notablemente en invierno (de 361  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano

a  $542.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno); y en MP-07 las concentraciones de dureza fueron muy similares tanto en verano como en invierno ( $676.0$  y  $689.3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ). MP-06, presenta concentraciones similares a las de los pozos, probablemente a que se encuentra lejos de la influencia de las líneas de flujo que pasan por el basurero. El agua en este sitio (MP-06) se clasifica como dura.

La dureza en el agua utilizada para fines domésticos ordinarios no es objetable hasta que alcanza niveles de  $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  o similares. Sin embargo, la dureza puede exceder estos niveles y en muchos sitios en especial aquellos donde las aguas han estado en contacto con rocas calizas y yeso, valores de dureza de  $200$  ó  $300 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  o inclusive aún mayores, son comunes (Hem, 1989). Las normas CAPRE (1994) establecen como un valor recomendado, valores menores de  $400 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  para agua de consumo humano.

#### ➤ **Sílice ( $\text{SiO}_2$ )**

El término sílica, entendido como  $\text{SiO}_2$ , es ampliamente referido al sílice en las aguas naturales; no obstante, se debe entender que la norma actual es hidratada y es más exactamente representada como  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  o  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

Las concentraciones de sílice están sobre los valores normales en aguas subterráneas (de  $1$  a  $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), esto se debe a que estamos en presencia de aguas bicarbonatadas sódicas que permiten hasta una concentración de  $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Custodio, Llamas, 2001); valores determinados en ambas épocas de muestreo (Tabla 8 b).

La génesis principal de la sílice son las rocas de origen volcánico, entre ellas las basálticas. Si los contenidos de sílice en el agua subterránea son elevados estamos en presencia de aguas de tipo magmáticas consideradas juveniles o recientes por su origen y tiempo de contacto con el medio hidrogeológico.



➤ **Cationes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , Fe total) y aniones ( $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ )**

El **calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ )** en la mayoría de puntos presentó concentraciones menores a los límites máximos admisibles por la norma CAPRE ( $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), los puntos que superan estas normas son el MP-04 con  $101.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y  $152.6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno, el MP-07 con  $203.2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y  $203.7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno (Tabla 8 a).

A pesar de que los compuestos de calcio contenido en rocas o en el medio hidrogeológico son pocos solubles en agua pura, su presencia es debido al anhídrido carbónico que puede ser introducido en el medio hidrogeológico proveniente de las emanaciones de gases (lluvia ácida) lo que hace que su solubilidad e incorporación al medio hidrogeológico aumente considerablemente. Este fenómeno es bien marcado en el área de estudio ya que los incendios espontáneos que se dan en el basurero por la presencia de metano y otros gases inflamables provoca que se de una amplia distribución de gases en toda la zona y que al momento de las lluvias sean lavados del ambiente atmosférico y generen condiciones ácidas.

Otras de las fuentes importantes del calcio son los residuos de la industria de la construcción, en los procesos químicos en la etapa de pelambre de las curtiembres. En el área de estudio, estos desechos son depositados en el basurero, contribuyendo a la presencia del mismo en la zona de descarga.

**Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) y Sodio ( $\text{Na}^+$ )** se encontraron en concentraciones menores al límite máximo admisible en todos los puntos muestreados ( $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  para el magnesio y  $200 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en el sodio), en ambas épocas (Tabla 8 a). Sin embargo, los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga, presentaron concentraciones un poco superiores (comparadas con las concentraciones de los pozos) en verano e invierno, destacándose el MP-07 (con  $41.1$  y  $44.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  para el magnesio; y  $100.2$  y  $105.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  para el sodio) y el MP-04 (con  $93.4$  y  $157.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  para el sodio).

El ión **magnesio** tiene propiedades similares al  $\text{Ca}^{+2}$  (por ser ambos alcalinotérreos), pero con mayor solubilidad y menor capacidad de precipitarse. Su presencia en el agua subterránea está ligada a la del calcio por ser componentes de rocas; también se hallan presentes en muchos productos industriales, es elemento común en los alimentos. A nivel industrial es empleado en el proceso de curtido de cueros, textil, papel, en artículos en general, sales de magnesio para producir fertilizantes, cerámicas, explosivos y medicinas. De ahí que tenga amplia distribución y en sitios donde se depositen desechos sólidos domiciliarios e industriales tienda a presentar altas concentraciones (OPS, 1987).

El **sodio** es otro elemento de elevada solubilidad y muy difícil precipitación y suele ir asociado al ión cloruro. Es uno de los más abundantes en los depósitos minerales. Los niveles más altos se encuentran en ríos y aguas subterráneas de las tierras bajas (zona de descarga) por efecto de disolución y enriquecimientos de las aguas al pasar por el material geológico. Otra fuente importante es la descarga de efluentes de desechos domésticos, comerciales e industriales.

La contaminación por sodio se debe a la gran variedad de usos que se le da en forma de sales; dentro de ellos se incluyen: descongelamiento de carreteras, industria del papel, farmacéutica, alimentos, vidrio, jabón y propósitos culinarios de los que gran parte son vertidos en efluentes o llevados a los basureros (OPS, 1987).

El **potasio** ( $\text{K}^+$ ) presentó valores que exceden los máximos admisibles por la norma de agua potable ( $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) en los puntos PP-17 de ENACAL (Escudo No. 1) con  $11.2$  y  $11.4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , y el MP-04 con  $13.3$  y  $13.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  tanto en la época seca como en la lluviosa respectivamente (Tabla 8 a). El agua subterránea del resto de puntos muestreados presentó concentraciones menores. En la mayoría de las aguas de los acuíferos, si la concentración de sodio substancialmente excede los  $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ; entonces, la concentración de potasio será (comúnmente) un décimo o la mitad de la concentración de sodio (Hem, 1989).

Es un ión de alta solubilidad pero fácilmente absorbido por las arcillas en formación de ahí que su abundancia sea menor que la del sodio a pesar que existe en mayores cantidades en las rocas. Las concentraciones presentes en aguas dulces están entre 01 y 10  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , su nocividad no presenta problemas en concentraciones normales ya que es un elemento vital para las plantas. Su origen procede de contaminación industrial, minera y agrícola (Custodio & Llamas, 2001).

La mayoría de las concentraciones de **hierro total (Fe)** en el agua subterránea de los pozos del área de estudio fue por debajo del límite de detección del método analítico ( $0.04 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), para ambas épocas (Tabla 8 b). El único punto que presentó concentraciones altas es el PP-02; con valores que sobrepasan los valores guías sugeridos para agua potable de  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . Es probable que estas concentraciones se deban a las condiciones físicas que presenta este pozo; ya que se pudo notar que es antiguo y tanto el equipo como parte del encamisado está en avanzado estado de oxidación.

En los lixiviados del basurero no se pudo detectar el **Fe**, debido a que el método analítico es por colorimetría; lo cual no permite detectarlo por la coloración de los lixiviados.

Los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga en invierno presentaron concentraciones de **Fe** que superan los máximos admitidos por las normas, sobresaliendo el MP-07 en ambas épocas de muestreo con concentraciones de 23.0 en verano y  $15.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno. Es probable que las concentraciones altas en las aguas subterráneas del MP-07 se debe a la presencia de condiciones reductoras creadas por la descomposición del material orgánico que se presenta en ese punto y su origen se vincula a la su disolución de rocas con contenido férrico, drenaje de minería, industrias que procesan hierro, sistemas de alcantarillado y lixiviación de rellenos sanitarios (OPS, 1987). La participación de materia orgánica disuelta en agua subterránea, en la reducción de óxidos de metal puede explicar el incremento en manganeso o en hierro en aguas extraídas de pozos cercanos a fuentes de carbón orgánico (Hem, J. D.; 1989). Los valores de

COD para MP-07 fueron los más elevados de los minipiezómetros instalados en la zona de descarga.

Las concentraciones de **boro (B)** presentes en las aguas subterráneas de los pozos analizados (Tabla 8 b) fueron menores al máximo admitido por la norma CAPRE ( $0.75 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) exceptuando el pozo PP-17 de ENACAL (Escudo 1) que en verano presentó  $1.23 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . En invierno, los pozos PP-04 (también de ENACAL Quinta Ena 1) con  $1.03 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , el PP-22 con  $0.78 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y los minipiezómetros MP-04 y MP-07 con  $1.42$  y  $0.95 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , respectivamente.

Las concentraciones normales de boro en agua subterránea en general son de  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  pudiendo llegar hasta  $10.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , en presencia de aguas termales o antiguas las concentraciones pueden elevarse. No es nocivo para el agua potable pero en plantas es nocivo en pequeñas cantidades (Custodio & Llamas, 2001).

El boro es el mineral más ampliamente distribuido de las rocas ígneas; puede ser liberado en gases volcánicos. El agua en áreas volcánicas y fuentes termales, pueden por lo tanto, contener concentraciones considerables de boro. El boro es un contribuyente a la capacidad *tampón* (buffer) del océano y de algunas aguas naturales. El boro está presente en aguas de desecho industrial y de alcantarillado, debido a que el bórax es ampliamente utilizado como agente de limpieza (Hem, 1989).

Los **carbonatos ( $\text{CO}_3^{-2}$ )** no se detectados ya que el pH se mantuvo menor a 8.3 que es cuando empiezan a presentarse en el agua subterránea. En su lugar se detectaron los **bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )** (Tabla 8 a) en concentraciones dentro del rango normal ( $50$  a  $350 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) para aguas subterráneas que se consideren dulces (Custodio Llamas, 2001)

Las concentraciones de bicarbonatos en el agua subterránea que estuvieron fuera de lo normal en ambas épocas, se presentaron en los minipiezómetros MP-04 con  $386.9$  en verano y  $579.2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno y el MP-07 con  $454.7$  en verano y  $315.2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno. El aporte de los bicarbonatos proviene de la disolución

del  $\text{CO}_2$  atmosférico o del suelo, de la disolución de calizas y dolomitas ayudado por el  $\text{CO}_2$  o los ácidos húmicos presentes en el suelo, es de suponerse que este último es el que influye de forma más relevante en estos puntos ya que en esta zona es donde se han encontrado la mayor presencia de compuestos orgánicos.

Las **cloruros** ( $\text{Cl}^-$ ) presentes en el agua subterránea de los pozos estuvieron en concentraciones menores al límite máximo admisible para agua potable por las normas CAPRE ( $250 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) en ambas épocas de muestreo (Tabla 8 a). En los minipiezómetros instalados en el basurero las concentraciones son altas con 1,749.8 en verano y 2,463.5  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno, éstos valores encontrados son típicos donde se da la contaminación por infiltraciones de basureros (Ehrig, 1999). Esta condición de aumento en los cloruros en invierno se debe a que en esta época hay más disponibilidad de agua que lleva consigo una mayor actividad bacteriana y por consiguiente mayor producción y percolación de lixiviados producidos en el basurero.

Los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga presentaron concentraciones menores al límite máximo admitido por la norma CAPRE; sin embargo, se destaca el MP-04 con mayores valores (131.1 y 236.6  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano e invierno respectivamente). Es probable que este punto sea afectado por las aguas que circulan en el arroyo Zacatiligüe cercano a este punto, las que transportan aguas residuales domésticas y de pequeñas industrias asentadas a orillas del mismo (como por ejemplo las curtiembres).

Las concentraciones de **sulfatos** ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en el agua subterránea de los pozos muestreados estuvieron dentro del rango 1 a 15  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en ambas épocas de muestreo (Tabla 8 a). Estos niveles son considerados normales en aguas dulces ya que los valores oscilan entre los 2 a 150  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Custodio & Llamas, 2001). En los lixiviados tomados en los minipiezómetros ubicados en el basurero las concentraciones son superiores en ambas épocas de muestreo de 56.2  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y 53.5  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno para MP-03 y hasta de 64.5  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en MP-02 (Anexo 2).

El agua subterránea de la zona de descarga presentó concentraciones ligeramente más altas de las encontradas en los pozos muestreados, solo en el MP-07 las concentraciones superan el máximo recomendado para agua potable según la norma CAPRE con valores de  $550.2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y  $504.2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno.

La **distribución de los sulfatos** en el área de estudio estuvo zonificada: una de ellas en el agua subterránea de pozos muestreados con las concentraciones más bajas; otra en los lixiviados del basurero con valores medios; y una última en la zona de descarga alrededor del MP-07 en donde se dan los mayores valores. Es probable que la procedencia se deba en parte a los lixiviados que llegan vía superficial al área y a las descarga de agua residuales de las población asentada en los barrios aledaños; éste se vuelve disponible cuando existen condiciones reductoras y si hay alta carga orgánica puede sufrir reducción a  $\text{S}$  o  $\text{S}^{-2}$ .

Las aguas selenitosas (con altos contenidos de sulfatos) no quitan la sed y tienen sabor desagradable y amargo. Si va asociado al sodio o al magnesio puede actuar como laxante; en cantidades elevadas es nocivo para las plantas y puede perjudicar la resistencia del concreto (Custodio & Llamas, 2001).

Los **fluoruros ( $\text{F}^-$ )** estuvieron bajos en todos los puntos (Tabla 8 b), en el MP-07 está justamente en el límite máximo admitido por la norma CAPRE de  $0.70 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano bajando las concentraciones para la época de invierno.

El flúor un ión bastante común, se encuentra formando parte de diversos minerales y en rocas volcánicas, debido al uso industrial que implica desechar sustancias con contenidos de flúor, la contaminación del ambiente está en todas partes, por esa razón existen trazas presentes en las plantas, alimentos y el agua (Custodio & Llamas, 2001).

Las concentraciones más altas se encuentran en aguas subterráneas en áreas ricas en minerales que contienen flúor, pero en la mayoría de ellas menores  $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . Es un elemento importante en la protección de la dentadura humana

(esmalte de los dientes) y en la estructura de los huesos; puede llegar a crear problemas tanto por su ausencia como por ingesta excesiva (OPS, 1987).

Fluoruro es asociado con gases volcánicos o fumarolas y en algunas áreas, éstas pueden ser fuentes importantes de flúor en aguas naturales. Cenizas volcánicas frescas pueden ser ricas en flúor, y la ceniza que está interdigitada con otros sedimentos puede contribuir a concentraciones de fluoruro en aguas subterráneas (Hem, 1989).

El **fósforo** presente en el agua subterránea en forma de **fosfatos** ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) estuvo en concentraciones menores a  $0.60 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Tabla 8 b), valores que coincide con el rango de concentraciones típicas del agua subterránea ( $0.01$  a  $1.00 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ; Custodio & Llamas, 2001). Sin embargo, en los lixiviados no fue detectado; lo que hace suponer que las concentraciones encontradas en el agua son procedentes del medio geológico.

La presencia del calcio limita su presencia en las aguas; sin embargo, el  $\text{CO}_2$  que puede encontrarse en el medio hidrogeológico puede favorecerlo. En concentraciones usuales (como las presentes en las aguas subterráneas de la zona) no originan problemas (Custodio & Llamas, 2001).

➤ **Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )**

En la Figura 22 se muestra el comportamiento de las especies del nitrógeno ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ) en el agua subterránea de la zona, se presentan las distribuciones de pozos y minipiezómetros que presentaron condiciones similares, las que son determinadas por las condiciones óxido-reductoras (REDOX) expresadas como Eh y pH, ya que entre estos dos parámetros existe una analogía; uno mide la actividad de protones (pH) y el potencial redox (Eh) mide la de los electrones.

En verano e invierno los pozos PP-02 y PP-03 fueron los que presentaron las condiciones más oxidadas, por tanto dominó el  $\text{NO}_3^-$  asociado a los Eh mayores, en cambio en el MP-07 y PP-08 el dominio fue del  $\text{NH}_4^+$ , estado más reducido de la familia del nitrógeno asociado a los valores bajos de Eh (43.5 y 30.9 mV respectivamente para verano y -48.0 y 77.6 mV para invierno) los restantes sitios muestreados oscilaron entre estos dos dominios agrupados a un sector central del gráfico. En verano y en invierno hay una mayor dispersión, la que puede estar asociada a las precipitaciones del invierno.

En las aguas subterráneas las concentraciones que se consideran normales (expresando las cantidades de estos iones como concentraciones de nitrógeno) se recomienda que sean menores a  $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en el caso de los  $\text{NO}_3^-$  y menores a  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de  $\text{NH}_4^+$ . En el caso de los  $\text{NO}_2^-$  es probable que las concentraciones sean menores que las del  $\text{NO}_3^-$  debido que se oxida fácilmente (pasando a  $\text{NO}_3^-$ ; Custodio & Llamas, 2001; OPS, 1987). Elevadas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en agua potable, pueden causar metahemoglobinemia en niños pequeños (enfermedad del bebé azul); de ahí la importancia en analizar las especies de nitrógeno en muestras de agua.

Sin embargo, la presencia de cualquiera de estas tres formas de especies del nitrógeno en agua subterránea, evidencian que se están llevando a cabo procesos óxido-reductores, gobernados por: 1) el medio ácido o básico (pH), 2) las condiciones oxidantes o reductoras (Eh), 3) la presencia o ausencia de oxígeno (medio aeróbico o anaeróbico, regulado por la presencia de oxígeno disuelto en el



medio), y 4) la presencia de bacterias aeróbicas o anaeróbicas, tal como se observa en la gráfica donde hay una distribución de cada uno de los pozos muestreados acorde con estas características.

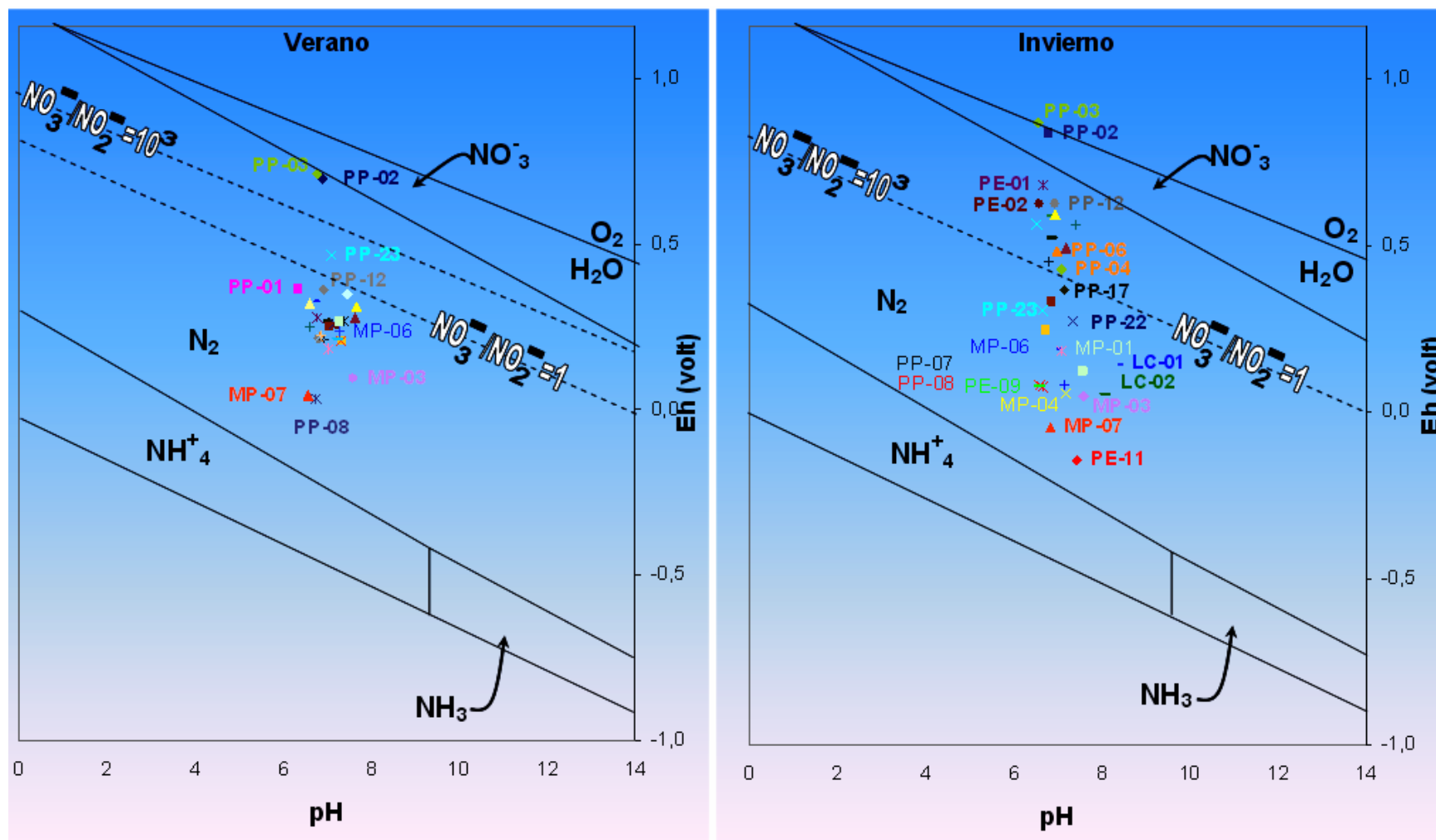


Figura 22. Diagrama Eh - pH para el sistema del nitrógeno (Fuente del Diagrama: Appelo, C. A. J. & Postma, D.; 1999).

En todos los pozos muestreados y en ambas épocas de muestreo hay presencia de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_4^+$  aunque las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  son más bajas que el límite de detección del método analítico de  $0.003 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Figura 23, Tabla 8 b). Estas especies orgánicas del nitrógeno son indicadores de contaminación por descargas de aguas negras o desperdicios orgánicos. Los  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , pueden ser indicativos de tal contaminación y su estado de degradación; cuando hay estado oxidado dominan los primeros y en ausencia de oxígeno (reducido) los segundos como se observa en la Figura 22. Por lo general, la contaminación pudo ocurrir en un sitio o tiempo substancialmente lejano al punto de muestreo ya que los  $\text{NO}_3^-$  son fácilmente transportados en agua y son estables en un amplio rango de condiciones a diferencia de los  $\text{NO}_2^-$  que son inestables en agua aireada (Hem, 1989).

En los pozos perforados, las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  guardan relación con la presencia del oxígeno, aunque los valores son menores al valor máximo admitido por la norma CAPRE de  $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  para agua potable; sin embargo, hay algunos pozos que presentan valores cercanos al sugerido por las normas (el PP-05 de ENACAL, presentó  $44.43 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y  $47.03 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno). Estas concentraciones de nitratos indican la presencia de una fuente lejana al punto de muestreo, con una carga continua de  $\text{NO}_3^-$  que es depositada en el acuífero y posteriormente es captada en este pozo; como podrían ser la influencia que están ejerciendo los residuos depositados en las letrinas de los asentamientos el Pantanal, Pochotillo y Madroño aledaños a ellos.

El pozo PP-06 de ENACAL (contiguo al PP-05) no está en uso por haber presentado concentraciones superiores al máximo admitido, sin embargo en el muestreo realizado en la época seca los valores fueron de  $11.07 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  a los 40 m y de  $11.87 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  a los 70 m de profundidad. Es probable que en ese entonces existiera una fuente de contaminación que estuviera afectando directamente la calidad del agua de éste pozo y que en la actualidad ya no exista.

Los pozos ubicados en corrales o cercanos a ellos, 3 de ellos también presentaron valores más altos que aquellos donde no había corrales o se encontraban alejados de ellos; como los pozos PP-04 de ENACAL con  $20.11 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , PP-25 con  $17.72 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en la época seca con tendencia al aumento en la época lluviosa. Concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  que se aproximan o exceden los  $44 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  por lo general se presentan en zonas rurales, y su presencia se atribuye al drenaje de potreros cercanos o tanques sépticos o pozos de aguas negras. Los animales de granja producen una cantidad considerable de nitrógeno orgánico que tiende a concentrarse en lugares donde un gran número de animales están confinados. La ocurrencia de elevadas concentraciones de nitratos en aguas subterráneas someras ha sido atribuida a los lixiviados de corrales de ganado por precipitación (Hem, 1989).

Las concentraciones de  $\text{NO}_2^-$  en los pozos son tan bajas que no superan los límites de detección del método ( $0.003 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ). En los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga se detectó en ambas épocas, pero las concentraciones no llegan a superar los máximos admitidos por la norma de  $3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , estas concentraciones oscilaron entre  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  a  $0.44 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . La casi ausencia de nitritos (y mayores concentraciones de nitratos, con bajas concentraciones de amonio) en el agua de los pozos, indican que los nitritos tienden a oxidarse (nitrificación) predominantemente. No obstante, desnitrificación (reducción) se está llevando a cabo también, por la presencia de amonio en el agua subterránea.

En cuanto a los lixiviados del basurero, no se reportan nitritos; por lo que las especies presentes son nitratos y amonio; ambas en elevadas concentraciones. En el basurero, se observa claramente la nitrificación y desnitrificación que se lleva en el sistema debido a las condiciones redox imperantes. En MP-02 el contenido de nitratos es  $26.6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , los nitritos no se detectaron, y el amonio está presente con  $601.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Anexo 2) en época seca, lo que nos indica que en este punto imperan las condiciones reductoras (especie reducida en mayor abundancia; especie oxidada en menor cantidad) y la desnitrificación es el proceso dominante.

Lamentablemente, MP-02 fue destruido por locales y no se pudo monitorear en época lluviosa.

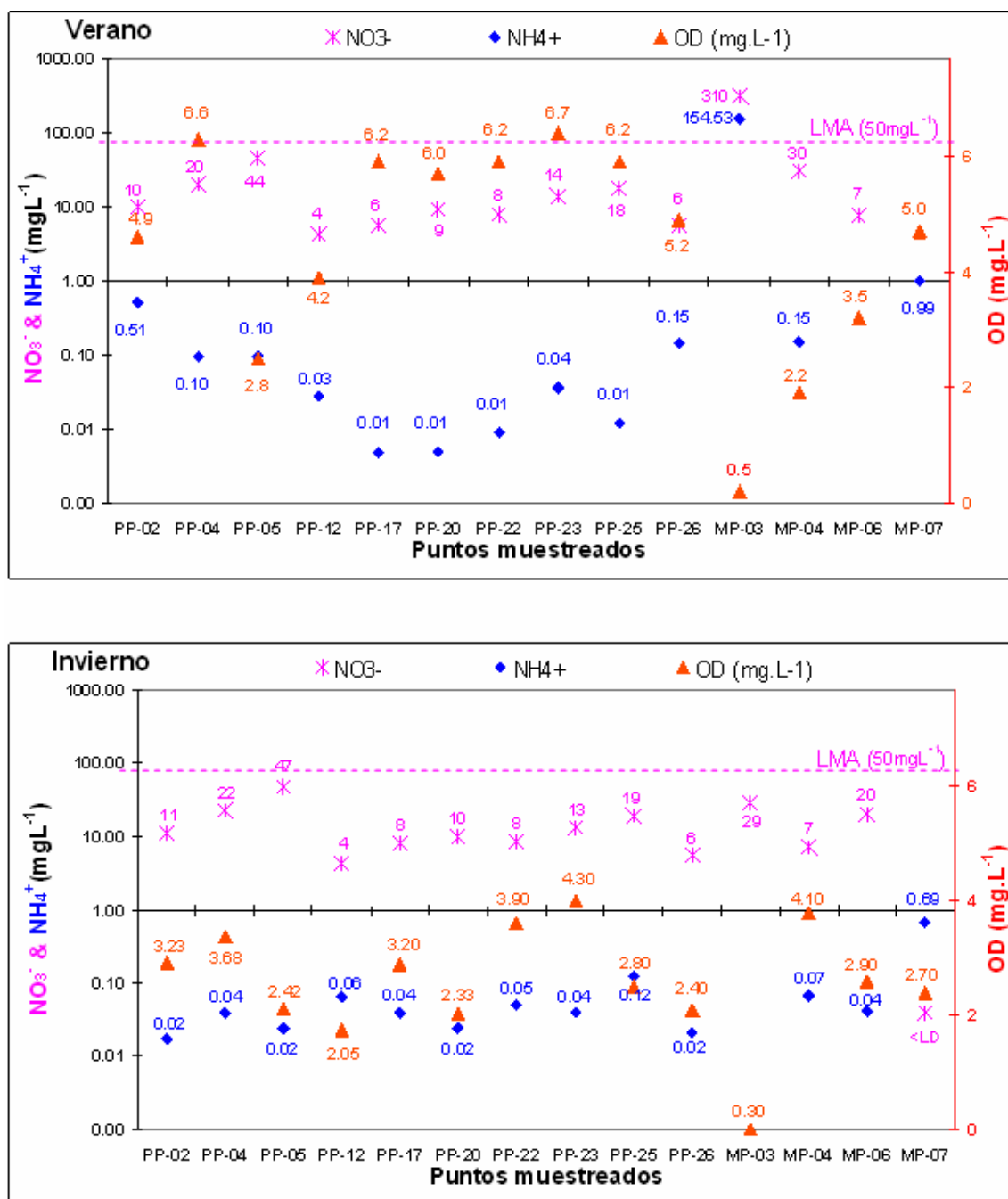


Figura 23. Concentraciones de nitratos y amonio en las agua subterráneas y en lixiviados del basurero de Granada (MP-03) en época seca y lluviosa.

El otro minipiezómetro instalado en el área del basurero (MP-03) presentó  $310.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de nitratos, los nitritos no se detectaron, y  $154.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  de amonio para la época seca, en donde se observa un cuasi-equilibrio entre ambas especies (oxidadas y reducidas), indicando que la nitrificación y desnitrificación están realizándose. Para el invierno, en este mismo punto, la concentración de nitratos disminuyó a  $28.6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , los nitritos no se detectaron, y el amonio (lamentablemente) no fue analizado, por lo que no se puede inferir las condiciones redox en el sitio.

En los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga el nitrato presentó concentraciones relativamente bajas (menores que el límite de detección del método analítico a  $29.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en el MP-04, en ambas épocas de muestreo). En el invierno, la concentración de nitratos disminuye en MP-04; mientras que aumenta en el MP-06 a  $19.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y se mantiene constante en MP-07 (<LD). Los nitritos oscilaron entre  $0.01$  a  $0.44 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y de trazas (menor que el límite de detección) a  $0.26 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno; observándose la disminución de concentraciones de nitrito en los 3 minipiezómetros en época lluviosa. El amonio se detectó de  $0.095$  a  $0.989 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y de  $0.041$  a  $0.685 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en época lluviosa; observándose una disminución de las concentraciones en invierno. De manera general, en MP-04 las concentraciones de las especies de nitrógeno disminuye en invierno y la nitrificación/desnitrificación se da en el sistema. En MP-06, se observa una tendencia a nitrificación en el sistema, en la época lluviosa. El MP-07 tuvo un comportamiento particular: en ambas épocas no se detectaron nitratos; las concentraciones de nitritos descendieron en la época lluviosa; y el amonio se detectó en altas concentraciones ( $0.99$  y  $0.69 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ; muy superiores a las concentraciones encontradas en el agua subterránea de pozos), lo que indica que las condiciones reductoras predominan en esa zona.

#### 4.5.2.2.3 Evaluación de la carga de contaminantes

##### ➤ Carbono Orgánico Disuelto (COD)

Con los resultados de los análisis de COD hechos en los mismos puntos con el espectrómetro UV y el analizador de carbono orgánico total (Analyzer Shidmadzu de la Universidad de Lunds en Suecia) se elaboró una correlación para obtener el factor de corrección 2.72 para aplicarlo a los resultados obtenidos a los análisis de el resto de muestras con el método de absorbancia de UV (Figura 24).

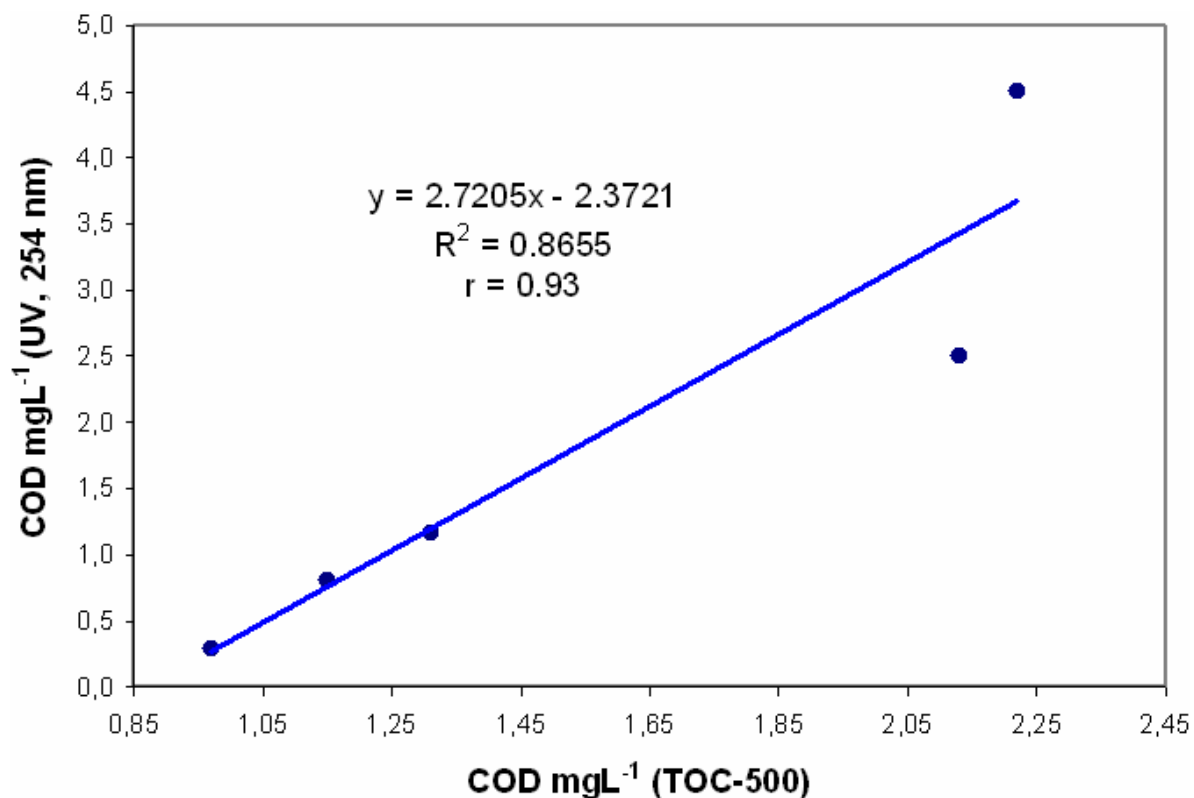


Figura 24. Correlación lineal entre las concentraciones de COD en agua subterránea de la zona de Granada obtenidas mediante UV a 254 nm y analizador de carbono orgánico total marca Shimadzu TOC-500.

Las concentraciones de COD encontradas en el agua subterránea de los pozos son menores de 3 mg·l<sup>-1</sup> en ambas épocas de muestreo; el único pozo que presenta concentraciones considerables (23.93 mg·l<sup>-1</sup>) es PP-08 muestreado en invierno (Anexo 2) donde existe la probabilidad que intercepte los lixiviados que

bajan del basurero, lo que sería una determinación aproximada de la concentración total del material orgánico presente (Hem, 1989).

Los minipiezómetros ubicados en el basurero presentan las mayores concentraciones: MP-02 con  $3,927.31 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en época seca; MP-01 con  $2,626.51 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en la lluviosa; MP-03 con  $3,057.03 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en la seca y  $3,294.61 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en la lluviosa (Tabla 8); esto es de esperarse ya que mas de 80% de los residuos depositados es materia orgánica. Es evidente que el origen principal proviene de la descomposición de la materia orgánica o del metabolismo bacteriano de la materia orgánica contenida en la basura y la posterior lixiviación, en las aguas subterráneas gran aporte de carbono soluble es producido por la oxidación de la materia orgánica (Custodio & Llamas, 2001).

Los minipiezómetros instalados en la zona de descarga presentaron concentraciones mayores a las cuantificadas en los pozos, en dos de ellos MP-04 y MP-06 las concentraciones no superan los  $26 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en ambas épocas de muestreo aunque son ligeramente mayores en invierno. En el MP-07 las concentraciones son mayores  $363.51 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en verano y  $222.48 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en invierno. La distribución del COD presenta zonificación de ocurrencia semejante a la observada en los cloruros (Figura 21), aparentemente hay una influencia hacia el punto MP-07 donde se ve la tendencia a aumentar las concentraciones de los iones y compuestos de carbono orgánico analizados.

El COD presenta una aparente distribución areal (Figura 25), que manifiesta una influencia hacia el MP-07 donde existe la posibilidad del aumento de las concentraciones, por ubicarse en el mismo sentido de las líneas de flujo del agua subterránea. Es evidente que el aporte del carbono soluble es producido por la oxidación de la materia orgánica. Por lo tanto la presencia en el MP-07 podría ser en parte a una fracción que llega desde el sector de La Joya mezclada con el agua subterránea y la otra llegar a través de la escorrentía superficial que viene del mismo sector.



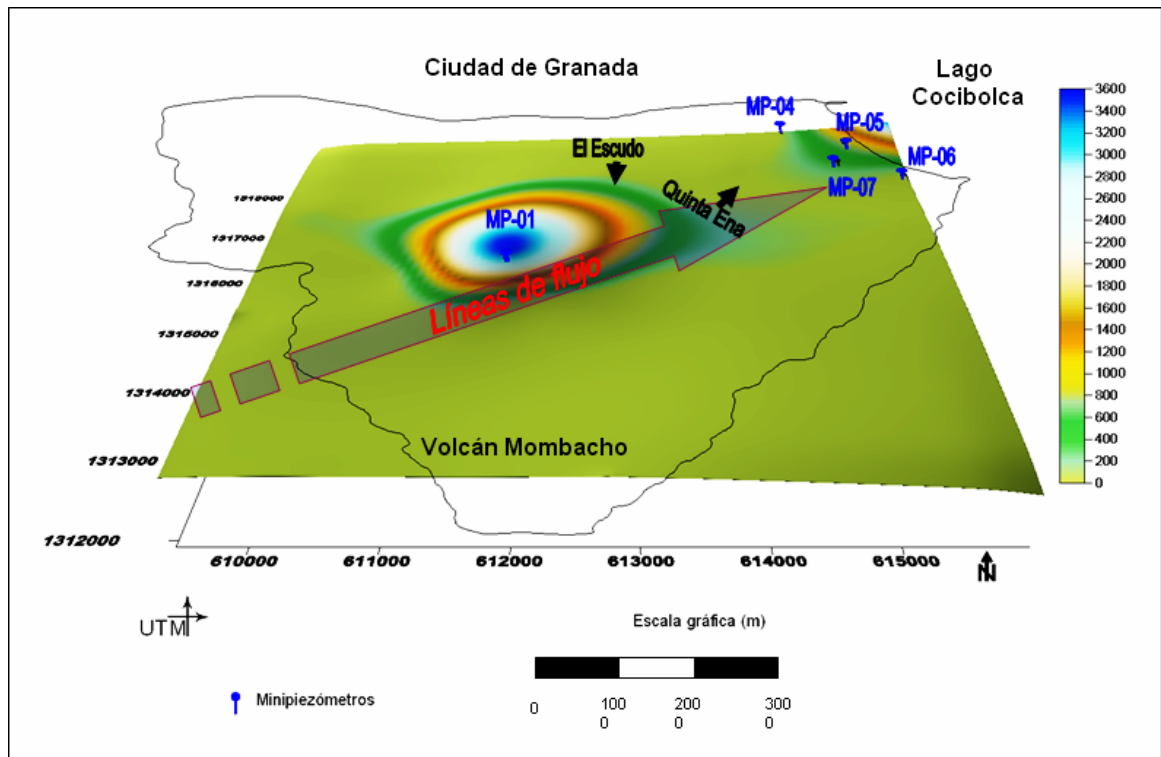


Figura 25. Distribución espacial de la materia orgánica en forma de COD (mg.l<sup>-1</sup>) en el área del basurero y parte de la cuenca hidrogeológica de Granada.

Las concentraciones de carbón orgánico en aguas subterráneas, normalmente son menores que las de las aguas superficiales (en ríos de regiones tropicales la concentración promedio de DOC es de 6 mg.l<sup>-1</sup>; Hem, 1989).

Este parámetro no cuenta con el valor guía para agua potable aunque su presencia confiere cierta toxicidad al agua al momento de aplicar métodos de desinfección como es en el caso de la cloración. La aplicación de cloro produce subproductos durante las reacciones con la materia orgánica (en este caso expresada como COD, ácidos húmicos), pudiendo llegar a producir haluros orgánicos (por ejemplo los clorofenoles que son carcinogénicos; OPS, 1987).

➤ **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Estos dos parámetros solo fueron realizados en los lixiviados del basurero en ambas épocas de muestreo; y en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga únicamente para la época de invierno.

Las concentraciones de DBO<sub>5</sub> en verano fueron de 580.32 y 373.06 mg·l<sup>-1</sup> en los minipiezómetros MP-02 y MP-03 respectivamente (Tabla 8 b y Anexo 2) , en invierno de 231.8 y 210.48 mg·l<sup>-1</sup> en el MP-01 y MP-03, en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga las concentraciones fueron menores con 1.65 mg·l<sup>-1</sup> en MP-04, 2.72 mg·l<sup>-1</sup> MP-05, 1.13 mg·l<sup>-1</sup> en MP-06 y 3.3 mg·l<sup>-1</sup> en MP-07.

A pesar de estos valores detectados en la zona de descarga (en especial para el MP-07), no se exceden los valores recomendados por la literatura de 4 mg·l<sup>-1</sup> como máximo admitido para el agua que se destina para consumo humano (Rodier, 1981).

Aparentemente hay una disminución de la demanda bioquímica en los lixiviados durante el invierno, quizás se deba a la incorporación de agua de lluvia con alto contenido de oxígeno que permite renovar las velocidades de reducción de la materia orgánica presente en el basurero. Aunque las concentraciones encontradas corresponden a valores similares (promedios de 180 mg·l<sup>-1</sup> y máximo 383 mg·l<sup>-1</sup>) al de otros sitios en el cual se está dando una degradación en la etapa conocida como fermentación metanogénica, realizada por organismos estrictamente anaeróbicos y en la cual las tasas de crecimiento de las bacterias es baja y va ligada a las condiciones ambientales tales como pH entre 6,5 y 7,5 con bajas oscilaciones de temperatura y suficiente contenido de humedad (Ehrig, 1999).

La DQO presentó valores de concentraciones de 2400 mg·l<sup>-1</sup> en MP-02 y 2000 mg·l<sup>-1</sup> MP-03 en verano, a los 1641.9 mg·l<sup>-1</sup> MP-01 y 1515.66 mg·l<sup>-1</sup> MP-03 en invierno, estos valores son muy parecidos a los medidos en lixiviados y al igual

que la DBO, son valores característicos en la etapa de fermentación metanogénica la cual presenta valores promedios de  $3000.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y máximos de  $4340.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  (Ehrig, 1999).

En los minipiezómetros de la zona de descarga los valores son mucho más bajos destacándose el MP-07 con  $67.14 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , el MP-04 con  $19.2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y MP-06 con  $9.6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . En las aguas subterráneas es común valores bajos de DQO, pero si estos llegan a superar los  $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  supondrían una contaminación externa (Custodio & Llamas, 2001).

Existe una estrecha relación entre la  $\text{DBO}_5$  y la DQO, ya que la  $\text{DBO}_5$  es una fracción de la DQO. La razón  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  refleja el grado de degradación de los lixiviados en el basurero en un momento determinado. La relación encontrada para ambas épocas es de 0.19 en verano y 0.14 en invierno lo cual quiere decir que estamos en presencia de una fermentación metanogénica ( $\text{DBO}_5/\text{DQO} < 0.1$ ) lo que indicaría que las sustancias orgánicas tienen dificultades para continuar con su degradación, esto por que las condiciones se vuelven desfavorables para la degradación al tener una baja del pH, lo que provoca una influencia directa sobre las bacterias metanogénicas por ser muy sensibles a las influencias del medio, además de tener una reproducción más lenta que las bacterias que actúan en la fase de fermentación ácida (Ehrig, 1999).

#### ➤ **Aceites y grasas**

Aceites y grasas fueron identificadas y cuantificadas en los lixiviados del basurero (Tabla 8 b). En la época seca con  $91.67 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en el MP-02 y  $111.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en MP-03. En la época lluviosa las concentraciones disminuyeron hasta  $9.33 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en el MP-01 y  $6.00 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en el MP-03, esto quizás se deba por la dispersión, dilución y arrastre a través de la escorrentía superficial ocasionada por las lluvias. En la época de lluvias se cuantificó en los minipiezómetros ubicados en la zona de

descarga y se logró determinar en el MP-07 con  $6.90 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y el MP-04 de  $0.30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , en los minipiezómetros MP-05 y MP-06 no se logró encontrar.

La presencia de aceites y grasas en las aguas naturales se originan del empleo de materias primas de origen animal, vegetal y mineral (petróleo), son insolubles en el agua y pueden existir en forma saponificada o emulsionada. Por lo general hay solventes orgánicos asociados a las grasas tales como tetracloruro de carbono, tricloroetileno y cloroformo que pueden ocasionar problemas de depuración biológica y digestión de fangos; por eso, se recomienda  $0.3 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  como máximo (Rodier, 1981).

#### ➤ **Fenoles**

La presencia de fenoles en el agua subterránea muestreada en los pozos estuvo menor que el límite de detección del método analítico del laboratorio, éste valor es de  $0.005 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , en dos de cinco minipiezómetros se logró cuantificar concentraciones: uno ubicado en el basurero MP-02 presentó  $0.022 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y otro en la zona de descarga MP-07 con  $0.040 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  en los otros tres minipiezómetros los valores estuvieron menor al límite de detección en la época seca para los puntos (Tabla 8 b). En la estación lluviosa únicamente se logró determinar concentraciones en los minipiezómetros ubicados en el basurero, en el MP-01 con  $0.021 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  y MP-03  $0.025 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

En ambas épocas de muestreo las concentraciones de fenoles encontradas superan los valores máximos admisibles por la norma CAPRE de  $0.002 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , su presencia esta muy relacionada con la alta solubilidad en el agua además de los solventes orgánicos, es cáustico y muy venenoso causa la muerte por ingestión aunque también se puede absorber por la piel. Las fuentes que originan la presencia de fenoles en el agua son los residuos industriales y residuos de aceites de automotores, plaguicidas y funguicidas empleados en el curado de madera. Los fenoles son tóxicos para la fauna acuática en concentraciones de  $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ . En

sistemas de tratamientos de agua potable, los fenoles se pueden combinar con el cloro y transformarse en clorofenoles también con efectos tóxicos para animales incluyendo el humano (Vitores, 2005; OPS, 1987).

#### 4.5.2.2.4 Metales pesados

Los resultados de los análisis para metales pesados en muestras de agua subterránea de un total de 18 puntos fueron distribuidos de la siguiente manera (Tabla 10 a y 10 b): en época de verano, 2 minipiezómetros en el basurero (lixiviados), 3 minipiezómetros en la zona de descarga y 13 pozos (12 perforados y 1 excavado); en invierno 2 minipiezómetros en el basurero, 4 minipiezómetros en la zona de descarga y 12 pozos (11 perforados y 1 excavado). De los 7 minipiezómetros instalados, en verano 2 no se muestrearon por no tener agua, uno de ellos ubicados en el basurero (MP-01) y el otro en la zona de descarga (MP-05); en invierno uno de los minipiezómetros ubicados en el basurero no se muestreó por destrucción o deterioro del mismo (MP-02).

Los resultados para cada metal pesado analizado se presentarán para ambas épocas de muestreo, primero para la época de verano seguida de la de invierno. En la primera campaña de muestreo (verano) se analizaron los siguientes metales pesados: aluminio (Al), cadmio (Cd), zinc (Zn), arsénico (As), cobre (Cu), cromo (Cr), litio (Li), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plomo (Pb) para todos los puntos seleccionados. Mientras que en invierno se analizaron todos los componentes considerados en la primera campaña exceptuando el **Hg** que en verano presentó concentraciones menores al límite de detección del método. En cuanto a los pozos monitoreados, el **Al** fue analizado para todos ellos (12); mientras que el **Zn** fue analizado en 2 pozos (PP-20 y PP-25), el **Cu** y **Cr** en el PE-02. Esta aclaración se debe a que en invierno se muestrearon menos elementos tomando en cuenta los resultados de la época seca. En aquellos puntos donde los valores son pequeños (<LD) o en donde el metal no fue detectado no se analizaron para la época de invierno.

Tabla 10 a. Resultados de los análisis de metales pesados en Granada en  $\mu\text{g.l}^{-1}$  (Abril – Octubre 2004).

Código	Nombre	Al		As		Cd		Zn		Cu		Cr	
	LD	3.99		2.02		0.15		35.95		3.84		0.71	
	LMA	200		10		50		3000		2000		50	
	Punto/Epoca	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	FAGANIC	68.70	-	<LD	-	1.43	-	<LD	-	<LD	-	0.96	-
PP-02	Hda. Q. Ena	105.75	45.06	<LD	-	0.87	-	238.92	-	7.92	-	1.42	-
PP-03	Q. Ena 3	128.70	-	<LD	-	0.43	-	<LD	-	<LD	-	2.44	-
PP-04	Q. Ena1	274.05	1638.00	<LD	-	1.07	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-05	Q. Ena2	53.10	94.20	<LD	-	1.24	-	119.67	-	<LD	-	0.88	-
PP-08	Finca San Agustin 1	-	987.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-12	Bo. Pantanal	152.70	44.88	<LD	-	0.59	-	108.12	-	<LD	-	<LD	-
PP-17	Escudo 1	58.05	29.94	3.26	-	1.43	-	139.47	-	<LD	-	<LD	-
PP-20	Felix Pérez	196.65	87.54	<LD	-	0.51	-	700.77	269.94	<LD	-	<LD	-
PP-22	Policia	65.10	24.90	<LD	-	0.71	-	240.72	-	26.76	-	1.16	-
PP-23	Sist. Penitenciario	64.65	217.98	<LD	-	0.89	-	188.97	-	<LD	-	1.32	-
PP-25	La Chanchera	290.55	50.58	<LD	-	0.78	-	631.32	355.20	<LD	-	<LD	-
PP-26	Tepeyac	134.70	284.76	<LD	-	0.71	-	125.97	-	7.38	-	<LD	-
PE-02	Tarila	-	219.30	-	-	-	-	-	-	-	<LD	-	<LD
PE-09	El Pachón	308.85	Seco	<LD	Seco	0.37	Seco	<LD	Seco	<LD	Seco	3.82	Seco
MP-01	Basurero	Seco	239.16	Seco	<LD	Seco	11.89	Seco	52.00	Seco	27.51	Seco	197.00
MP-02	Basurero	770.10	destruido	<LD	destruido	195.60	destruido	560.04	destruido	11.82	destruido	318.00	destruido
MP-03	Basurero	974.10	223.80	<LD	3.12	138.60	24.97	983.40	127.00	4.92	69.78	138.00	174.00
MP-04	Zona de descarga	419.25	238.65	8.34	14.09	3.07	8.59	79.17	159.78	12.36	5.79	14.52	1.86
MP-05	Zona de descarga	Seco	331.80	Seco	5.79	Seco	2.74	Seco	116.58	Seco	<LD	Seco	1.38
MP-06	Zona de descarga	346.35	2604.00	5.34	4.67	0.96	2.26	202.02	215.16	5.94	36.30	1.36	16.98
MP-07	Zona de descarga	4917.00	195.60	<LD	4.84	19.62	17.41	121.92	144.90	14.22	14.85	4.00	7.41

PP Pozo perforado

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)

- No analizado

PE Pozo excavado

LD Límite de detección del método

MP Minipiezómetro

&lt;LD Menor que el límite de detección

Tabla 10 b. Resultados de los análisis de metales pesados en Granada en  $\mu\text{g.l}^{-1}$  (Abril – Octubre 2004).

Código	Nombre	Li		Mn		Hg		Ni		Pb	
	LD	1.13		39.66		0.009		5.00		4.64	
	LMA	-		500		1		50		10	
	Punto/Epoca	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	FAGANIC	15.32	S/B	<LD	S/B	<LD	S/B	22.89	S/B	<LD	S/B
PP-02	Hda. Q. Ena	6.72	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-03	Q. Ena 3	6.08	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-04	Q. Ena1	14.74	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-05	Q. Ena2	16.14	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-08	Finca San Agustín 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-12	Bo. Pantanal	5.74	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-17	Escudo 1	47.58	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-20	Felix Pérez	2.42	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-22	Policia	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-23	Sist. Penitenciario	2.18	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-25	La Chanchera	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PP-26	Tepeyac	1.84	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-	<LD	-
PE-02	Tarila	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE-09	El Pachón	4.44	Seco	40.26	Seco	<LD	Seco	<LD	Seco	<LD	Seco
MP-01	Basurero	Seco	28.88	Seco	918.79	Seco		Seco	77.37	Seco	10.44
MP-02	Basurero	25.68	destruido	58.20	destruido	<LD	destruido	353.00	destruido	58.65	destruido
MP-03	Basurero	38.64	26.94	70.95	1389.86	<LD	-	333.00	140.82	85.62	9.69
MP-04	Zona de descarga	53.92	83.97	71.55	103.00	<LD	-	14.97	<LD	<LD	4.86
MP-05	Zona de descarga	Seco	10.42	Seco	210.90	Seco	-	Seco	<LD	Seco	<LD
MP-06	Zona de descarga	22.82	13.06	189.60	1622.00	<LD	-	<LD	5.10	<LD	<LD
MP-07	Zona de descarga	28.90	14.80	628.88	2466.00	<LD	-	10.53	7.38	<LD	<LD

PP Pozo perforado

PE Pozo excavado

MP Minipiezómetro

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)

LD Límite de detección del método

<LD Menor que el límite de detección

- No analizado

S/B Sin bomba

## Aluminio (Al)

El **Al** está presente en los 13 pozos muestreados, tanto en verano como en invierno (Tabla 10 a). En verano las concentraciones de **Al** se encuentran desde los 53.1  $\mu\text{g.l}^{-1}$  hasta los 308.8  $\mu\text{g.l}^{-1}$ . En invierno, el rango de concentraciones detectadas en los pozos monitoreados osciló entre 24.9  $\mu\text{g.l}^{-1}$  hasta los 1,638.0  $\mu\text{g.l}^{-1}$ , presentando leve disminución en las concentraciones en los pozos y minipiezómetros ubicados en el basurero; esto podría estar asociado a la dilución o dispersión provocada por las precipitaciones en el área. Sin embargo, los pozos y minipiezómetros ubicados en la parte media y baja alineados con las líneas de flujo que vienen desde el sector del basurero, se nota un aumento considerable en la concentración del **Al**; caso específico el pozo PP-04 (Quinta Ena 1) que pasó de 274  $\mu\text{g.l}^{-1}$  a 1,638.0  $\mu\text{g.l}^{-1}$  y el MP-06 que pasó de 346.4  $\mu\text{g.l}^{-1}$  a 2,604.0  $\mu\text{g.l}^{-1}$  (Figura 26). Esto podría deberse a la influencia de los lixiviados que son incorporados al producirse la recarga por precipitación en la época lluviosa.

Los pozos que sobrepasan el límite máximo admisibles para consumo humano establecido por las normas regionales CAPRE el cual es de 200  $\mu\text{g.l}^{-1}$  de **Al** son: PP-04 (verano e invierno), PP-08 (invierno), PP-23 (invierno), PP-26 (invierno) y PE-02 (invierno).

En los minipiezómetros tanto del basurero como de la zona de descarga, las concentraciones de **Al** son superiores a las encontradas en los pozos y todas ellas sobrepasan los valores de la norma CAPRE. Los MP ubicados en el basurero presentan concentraciones de **Al** de 770.10  $\mu\text{g.l}^{-1}$  en el MP-02 y 974.10  $\mu\text{g.l}^{-1}$  en el MP-03, mientras que los de la zona de descarga presentan valores de 419.25  $\mu\text{g.l}^{-1}$  el MP-04, 346.35  $\mu\text{g.l}^{-1}$  en el MP-06 y 4,917.0  $\mu\text{g.l}^{-1}$  en el MP-07; siendo éste último, el máximo valor reportado en todos los puntos monitoreados.

Es probable que la concentración de **Al** en el punto MP-07, lugar donde se detecta la influencia del arroyo que viene del sector del basurero esté ocurriendo descomposición del material orgánico que ha llegado y se ha acumulado en el área a lo largo del año, lo que provoca una disminución de la circulación del agua



tanto superficial como subterránea, generando un ambiente más ácido. En el MP-06 no hay influencia de material orgánico o escorrentía que logre mantener una humedad imperante en el sector, sin embargo cuando se dan las lluvias hay lavado e incorporación de materiales que provocan aumento en la concentración del **Al**.

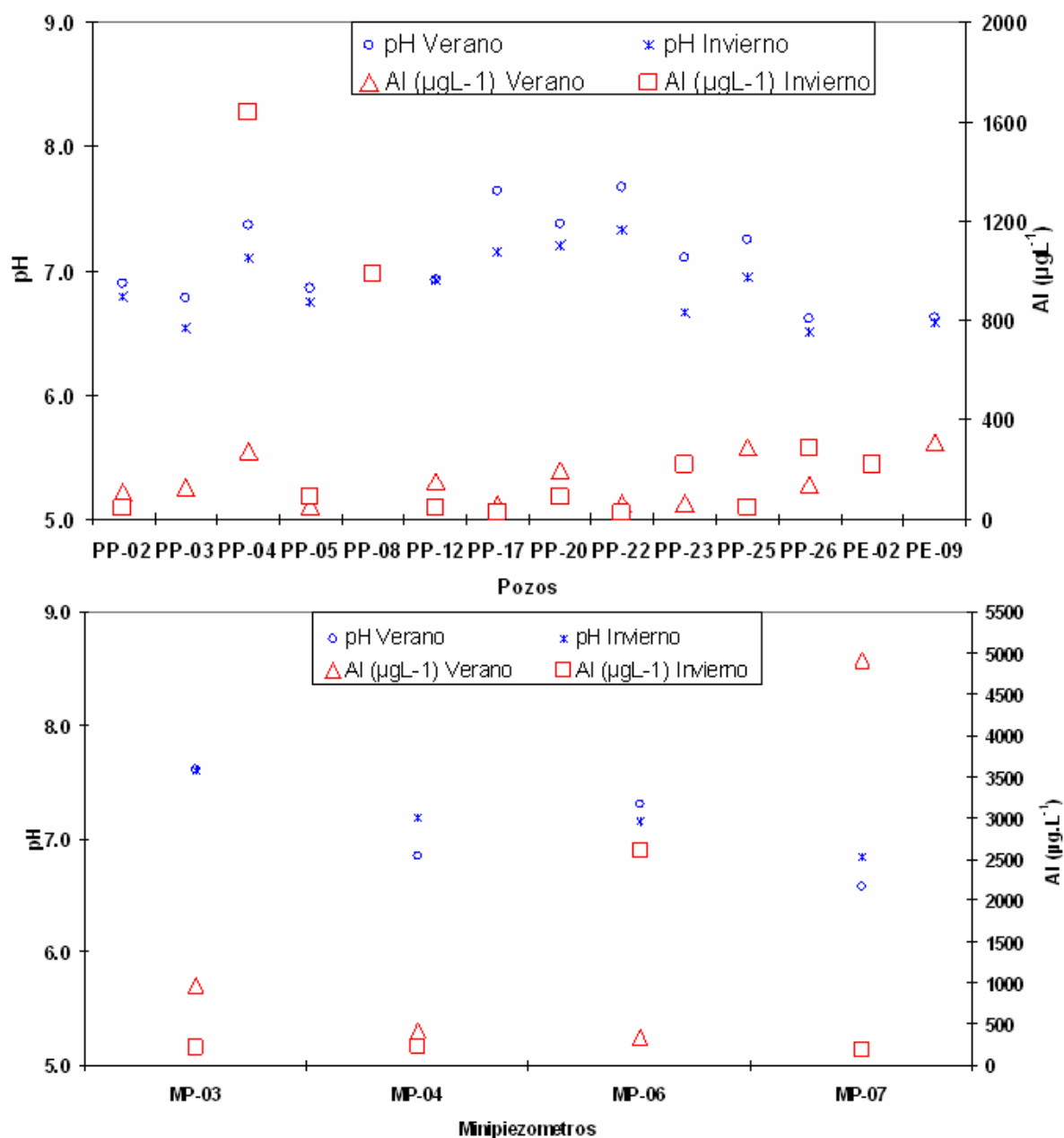
La presencia del **Al** en el agua subterránea de esta zona podría ser una consecuencia de la amplia distribución natural y las actividades humanas. Por lo general se encuentra presente en el aire, alimentos, desechos industriales, suelo y polvo atmosférico, lo que le confiere facilidad de incorporación al agua subterránea a través de la precipitación atmosférica, lixiviación de minerales de las rocas y desechos antropogénicos (OPS, 1987). Situación que podría estar originando las altas concentraciones en el basurero y en la zona de descarga.

La lixiviación de minerales de las rocas como aluminosilicatos de áreas volcánicas como la descrita en la zona donde se perforó la calicata número 1 de este estudio y donde se ubican los pozos con estas altas concentraciones, quizás sea la fuente más importante.

Los complejos orgánicos de **Al**, probablemente ocurran en algunas aguas naturales que presentan coloración debido a la disolución de material húmico (Hem, 1989). De esta manera, las altas concentraciones de **Al** reportadas en los minipiezómetros (tanto del basurero como de la zona de descarga), se deben al alto contenido de materia orgánica presente. Del MP-03 al MP-07 presentan las mayores concentraciones de COD de todos los puntos muestreados (incluyendo a los pozos perforados); donde MP-03 y MP-07 presentan los mayores valores de COD de todos los minipiezómetros. Concentraciones de aluminio de  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  ( $1000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) o más en agua que presenta un pH neutral o cerca de la neutralidad, probablemente se deba a materia particulada (Hem, 1989).

El **Al** no es un nutriente esencial para el hombre y las altas concentraciones no le son perjudiciales, más bien el valor máximo admitido por las normas para agua

potable es definido por razones estéticas al provocar un descoloramiento excesivo en el agua.



Figuras 26. Concentraciones de Al ( $\mu\text{g}\cdot\text{l}$ ) en pozos y minipiezómetros en época de verano e invierno.

➤ **Cadmio (Cd)**

El **Cd** se analizó en los pozos únicamente en verano y se encontró en concentraciones de  $0.37 \mu\text{g.l}^{-1}$  a  $1.43 \mu\text{g.l}^{-1}$  las cuales son bajas en comparación a las concentraciones de **Cd** encontradas en los lixiviados del basurero ( $0.96 \mu\text{g.l}^{-1}$  a  $195.6 \mu\text{g.l}^{-1}$  en verano y de  $2.26 \mu\text{g.l}^{-1}$  a  $24.97 \mu\text{g.l}^{-1}$  en invierno). El MP-02 y el MP-03, superan los  $50 \mu\text{g.l}^{-1}$ , que es la concentración máxima admisible para consumo humano según las normas regionales CAPRE. Las concentraciones encontradas en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga (MP-04 al MP-07) no sobrepasan los valores recomendados; pero se evidencia en el MP-07 con  $19.62 \mu\text{g.l}^{-1}$  y  $17.41 \mu\text{g.l}^{-1}$  en verano e invierno respectivamente, la posible influencia de los lixiviados del basurero que son llevados hasta ahí por el arrastre superficial cuando se dan las precipitaciones en el área.

El **Cd** es un elemento poco común se encuentran altas concentraciones en regiones muy específicas de la tierra, la distribución en todo el planeta está a nivel de trazas, donde las aguas no contaminadas contienen menos de  $1 \mu\text{g.l}^{-1}$ . La presencia del **Cd** en alimentos, suelo, aire, agua y plantas en los últimos años es provocada por la contaminación proveniente de el desarrollo industrial al ser utilizado para electroplatinado y para pigmentos en pintura, tinta de impresión y plásticos; además es ampliamente usado como estabilizador para plásticos de PVC, en baterías eléctricas, en tubos fluorescentes y de video. Muchos de estos usos, tienden a hacer que el elemento esté disponible en el agua que entra en contacto con depósitos sepultados (basureros). Otro factor de importancia es la tendencia del cadmio a entrar en la atmósfera a través de la vaporización a elevadas temperaturas (combustión de combustibles fósiles; Hem, 1989). Su solubilidad está gobernada por la fuente de donde proviene y de la acidez del agua (OPS, 1987).

## ➤ **Zinc (Zn)**

El **Zn** se encontró en los 18 puntos muestreados en verano, De los 13 pozos monitoreados (Tabla 10 a) en 4 de ellos se presentaron concentraciones menores al límite de detección del método ( $35.9 \mu\text{g.l}^{-1}$ ) y en ninguno de ellos se reportaron concentraciones mayores al máximo admitido por las normas CAPRE ( $3000 \mu\text{g.l}^{-1}$ ). Las mayores concentraciones fueron encontradas en los pozos PP-20 y PP25 con  $700.7 \mu\text{g.l}^{-1}$  y  $631.3 \mu\text{g.l}^{-1}$  respectivamente para verano. En invierno estos fueron los únicos pozos monitoreados y las concentraciones detectadas fueron  $269.94 \mu\text{g.l}^{-1}$  y  $355.20 \mu\text{g.l}^{-1}$  respectivamente para ambos pozos; es probablemente que la disminución de concentración se deba a la incorporación de agua de lluvia y posterior dilución y adsorción al medio geológico en la época de invierno. La ubicación de ambos pozos con respecto al basurero es a 2 km al norte y a 1 km al suroeste del mismo respectivamente; aproximadamente a la misma elevación, lo que implica que ambos pozos se encuentran bajo la misma trayectoria de la circulación del aire, el cual lleva los gases producto de la incineración espontánea de la basura. Quizás eso contribuya a que estos pozos presenten mayores concentraciones ya que en estudios se han encontrado niveles mayores de **Zn** en zonas urbanas que en zonas rurales donde la influencia antropogénica e industrial es menor (OPS, 1987).

Las concentraciones reportadas para los minipiezómetros van de 79.17 a  $983.40 \mu\text{g.l}^{-1}$  en verano y de 52.00 a  $215.16 \mu\text{g.l}^{-1}$  en invierno. Los valores mayores fueron registrados en verano:  $560.04 \mu\text{g.l}^{-1}$  (MP-02) y  $983.40 \mu\text{g.l}^{-1}$  (MP-03). Aunque estas concentraciones son altas (Figura 27) no sobrepasan el valor admitido de  $3,000 \mu\text{g.l}^{-1}$ .

Las concentraciones y distribución del **Zn** en el ambiente están relacionadas con la composición de la corteza terrestre y en muchos casos dependen de los factores de proximidad a la fuente que emitan este elemento. Las concentraciones encontradas en todos los puntos muestreados pueden estar relacionadas con las concentraciones naturales en los suelos ya que son

estimadas entre 1 y 300 ng·kg<sup>-1</sup> y en el agua natural de 10 a 1000 µg.l<sup>-1</sup>, esto da la posibilidad de que las concentraciones del **Zn** tengan su origen en su alta solubilidad como sales de cloruro y sulfatos que fácilmente llegan al agua subterránea (OPS, 1987) ya sea como una fracción de los lixiviados producidos en el basurero, como por la influencia de la deposición de sales que son llevadas con los desechos que deja la industria REPTINIC en el basurero.

El **Zn** por ser un elemento esencial en animales y plantas, su toxicidad en el hombre es improbable ya que existen mecanismos eficientes de control homeostático que regulan la ingesta tanto a través del agua potable como de los alimentos (OPS, 1987).

#### ➤ **Arsénico (As)**

De los 13 pozos muestreados, solo en el PP-17 (propiedad de ENACAL) se detectó **As** (3.26 µg.l<sup>-1</sup> en verano únicamente), sin sobre pasar el valor permitido de 10 µg.l<sup>-1</sup> (LD). Estas concentraciones que se presentan (Tabla 10 a), indican que el agua potable no está contaminada con Arsénico ni es un riesgo para la salud pública de la población que se abastece de estos pozos.

En cuanto a los minipiezómetros, para la época de verano de los 3 ubicados en el basurero ninguno presentó valores mayores al LD y los ubicados en la zona de descarga el MP-04 con 8.34 µg.l<sup>-1</sup>, valor cercano al permisible; mientras que el MP-06 registró 5.34 µg.l<sup>-1</sup>. Las concentraciones medidas en los minipiezómetros tanto los ubicados en el basurero como en la zona de descarga en la época de invierno tuvieron en su mayoría tendencia al aumento (Figura 27). Es importante destacar que el minipiezómetro (MP-06) que está más alejado de la influencia de los arroyos Zacatiligüe y del arroyo que baja desde el basurero disminuyó en sus concentraciones detectadas (de 5.34 a 4.67 µg.l<sup>-1</sup>). Esta tendencia coincide con la ubicación geográfica de los aserríos a los largo del arroyo Zacatiligüe que existen en Granada, caracterizados por el uso de compuestos químicos para curar

madera con altos contenidos de arsénico los cuales pueden llegar a distribuirse superficialmente con las lluvias de la época de invierno.

El **As** es un elemento común presente en el medio ambiente de forma natural, algunas veces asociado a los compuestos del azufre y fuentes termales. El incremento de las concentraciones que sobrepasan los niveles naturales muchas veces está asociado a la contaminación antropogénica dada por las descargas industriales y en muchos casos asociada a plaguicidas arsenicales usados en la agricultura y en el curado de maderas. En el humano cuando hay casos de envenenamientos, afecta el sistema nervioso central, el sistema gastrointestinal, los conductos respiratorios y la piel (OPS, 1987).

#### ➤ **Cobre (Cu)**

Las concentraciones de **Cu** encontradas en los puntos muestreados son bajas en ambas épocas de muestreo (Tabla 10 a y Figura 27), En 10 puntos (9 pozos perforados y 1 excavado) de los 18 puntos, las concentraciones son menores que el límite de detección del método ( $3.84 \mu\text{g.l}^{-1}$ ) y en 8 puntos (3 pozos perforados y 5 minipiezómetros) se logró cuantificar con valores que van desde los  $4.92 \mu\text{g.l}^{-1}$  (minipiezómetro ubicado en el basurero) hasta  $26.76 \mu\text{g.l}^{-1}$  (pozo PP-22 ubicado en el complejo policial, Departamento de Procesamiento, punto localizado aguas arriba antes del basurero). Estos valores podrían estar asociados a los niveles normales presentes en la naturaleza ya que en el agua potable normalmente varían entre  $10 \mu\text{g.l}^{-1}$  y  $500 \mu\text{g.l}^{-1}$  (OPS, 1987).

Las concentraciones de cobre recomendadas para evitar efectos de corrosión en utensilios, tuberías y manchado de la ropa por la OPS es de  $1\,000 \mu\text{g.l}^{-1}$ . En aguas subterráneas no representa problemas ya que no se sabe sobre afectaciones a la salud. Las normas CAPRE establecen como límite máximo admisible de  $2\,000 \mu\text{g.l}^{-1}$  no obstante es importante tomar en cuenta que este puede llegar a aumentar en los sistemas de abastecimiento porque las redes de

distribución y fontanería doméstica antiguas, en su mayoría son de cobre; aunque la incorporación está en dependencia de la condiciones de pH y concentración de carbonatos en el agua.

## Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en Granada

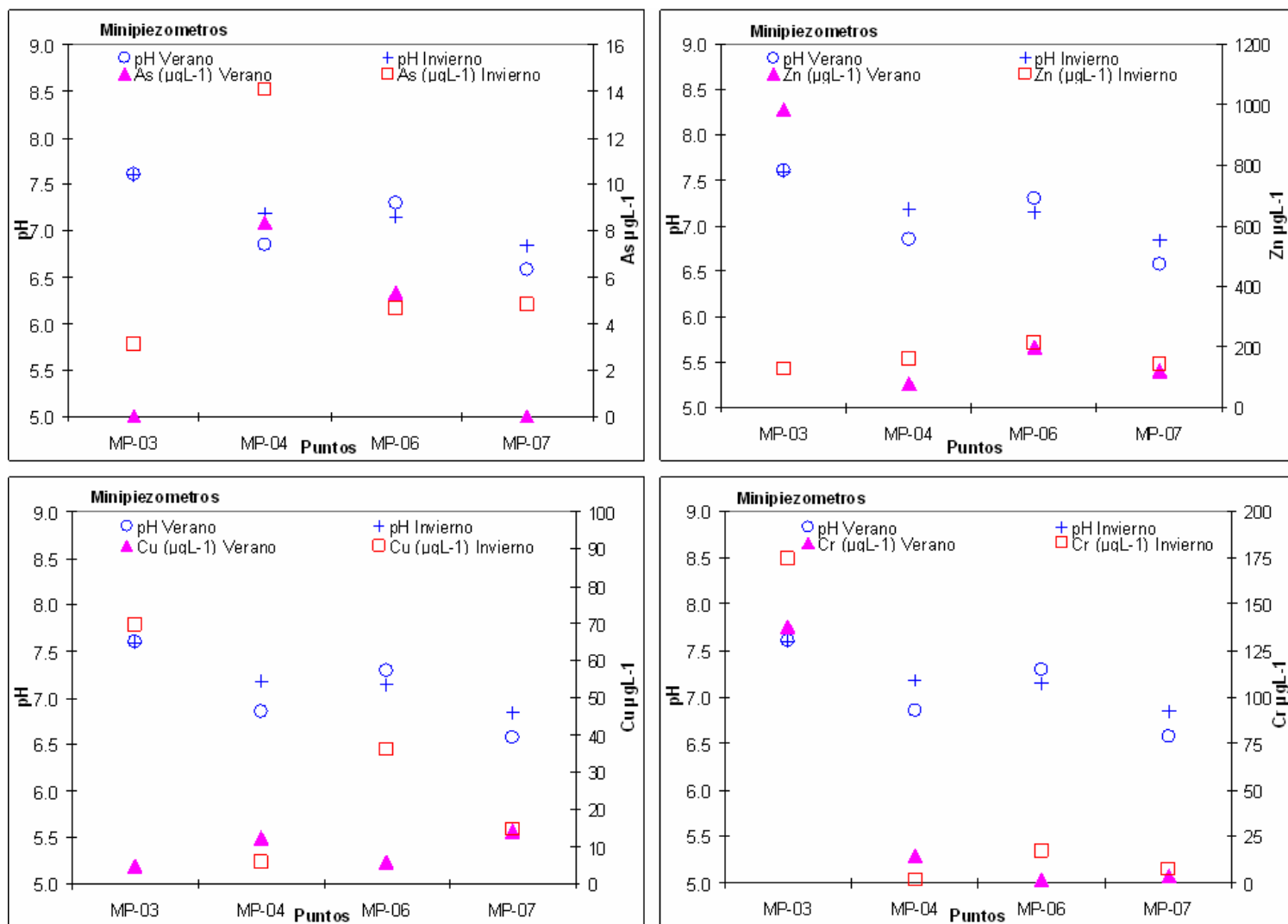


Figura 27. Concentración (en  $\mu\text{g/L}$ ) de metales pesados Arsénico (As), Zinc (Zn), Cobre (Cu) y Cromo (Cr) cuantificados en minipiezómetros ubicado en el basurero (MP-03) y en la zona de descarga (MP-04, MP-06, MP-07).



➤ **Cromo (Cr)**

De los 18 puntos muestreados (13 pozos y 5 minipiezómetros), en todos se detectó la presencia del **Cr** en verano; mientras que en invierno, el cromo fue detectado únicamente en un pozo excavado (concentraciones menores al límite de detección del método) y en los 5 minipiezómetros (Tabla 10 a).

En ambas épocas de muestreo las concentraciones de **Cr** en muestras de agua subterránea de pozos presentaron concentraciones inferiores al valor máximo admitido por las normas de calidad de agua que es de  $50 \mu\text{g.l}^{-1}$ ; 6 pozos perforados en verano y 1 pozo excavado en invierno presentaron concentraciones menores al límite de detección del método analítico de  $0.71 \mu\text{g.l}^{-1}$ . En verano 6 pozos perforados, 1 pozo excavado y 3 minipiezómetros, presentaron concentraciones menores a  $14.5 \mu\text{g.l}^{-1}$ ; mientras que en invierno solamente en 4 minipiezómetros se detectó este rango de concentración. En el basurero el máximo rango de concentraciones se detectó en los MP-02 y MP-03 en el verano; mientras que para invierno, se detectaron en MP-01 y MP-03. El rango de concentración de **Cr** en el MP-03 se incrementó ligeramente en el invierno.

También se destaca, que las concentraciones de los minipiezómetros en la zona de descarga presentan una tendencia a aumentar en la de invierno (MP -06 con  $16.98 \mu\text{g.l}^{-1}$  y MP-07 con  $7.41 \mu\text{g.l}^{-1}$ ). Esto es una posible evidencia de afectaciones de los residuos depositados en el basurero por las industrias curtidoras de cuero que operan en la zona de Granada ya que se presentan concentraciones superiores a  $9,7 \mu\text{g.l}^{-1}$  que es considerado normal en agua subterránea por la OPS 1987 (Figura 27).

Las concentraciones de **Cr** en la naturaleza son bajas, menores a  $9.7 \mu\text{g.l}^{-1}$  en el agua y  $0.02 \mu\text{g.m}^3$  en el aire, las cantidades industriales se restringen a pocos países y su aumento se da por la influencia de actividades industriales, empleo de lodos cloacales como fertilizantes. A pesar de ser un elemento muy insoluble éste es incorporado al agua subterránea si está siendo influenciado por pH ácido o si se encuentra en forma de sales de sulfato de cromo o complejos químicos,

condiciones que son muy comunes en las industrias curtidoras de cueros (OPS, 1987).

La presencia de altas concentraciones de **Cr** encontradas en los lixiviados del basurero, probablemente se origina por la deposición de residuos que la empresa curtidora de cuero REPTINIC realiza en el basurero y la que está ubicada a unos 200 metros del basurero y a la entrada del mismo. Esta situación fue observada en varias ocasiones cuando se estaba trabajando en la etapa de campo de este proyecto de graduación. La probable afectación que podría tener influencias en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga y en la cual hay presencia de **Cr**, que incrementa durante el invierno se podría deber a la canalización de las aguas residuales que salen de las pilas de tratamiento, que esta misma industria posee, las cuales se dirigen hacia el cráter contiguo al basureo (norte del basurero), en donde el nivel freático es muy superficial y en invierno hay estancamiento e infiltración de aguas pluviales.

#### ➤ **Litio (Li)**

Las concentraciones cuantificables de **Li** se detectaron en 16 puntos de los 18 muestreados en verano (Tabla 10 b); en los otros 2 sitios, los valores son menores al límite de detección del método ( $1.13 \mu\text{g.l}^{-1}$ ). En invierno, el **Li** fue analizado únicamente en los minipiezómetros, detectándose en 6 de ellos. Para este elemento no se tiene valores guías en las normas consultadas (OPS, 1987, CAPRE, 1994).

Las concentraciones en el agua subterránea oscilaron desde los  $1.84 \mu\text{g.l}^{-1}$  hasta  $53.92 \mu\text{g.l}^{-1}$  en el verano y de  $10.42 \mu\text{g.l}^{-1}$  a los  $83.97 \mu\text{g.l}^{-1}$  en el invierno. En cuanto a las concentraciones de Li en el basurero; en verano el rango osciló desde  $25.68 \mu\text{g.l}^{-1}$  hasta  $38.64 \mu\text{g.l}^{-1}$  y en invierno de  $26.94 \mu\text{g.l}^{-1}$  a  $28.88 \mu\text{g.l}^{-1}$ .

Los puntos con valore más altos en el verano se alinean desde el campo de pozos el Escudo de ENACAL (PP-17) con mayor gradiente de concentración hacia los

pozos PP-01, PP-04 y PP-05 (estos dos últimos también propiedad de ENACAL) y en la dirección de la zona de descarga.

Es un elemento muy soluble en agua y comúnmente está asociado a la aguas cloruradas; las concentraciones normales en agua subterránea varían entre 1 a 500  $\mu\text{g.l}^{-1}$ . Por lo general tienen origen en aguas subterráneas de ambiente volcánico (Custodio & Llamas, 2001). Es probable que la distribución encontrada en todos los sitios tenga este origen ya que en donde se presentaron altos valores de conductividad y cloruros, se detectó **Li** (como en el caso del pozo PP-17 de ENACAL).

El litio es un elemento que no ocasiona nocividad o problemas cuando se presenta en bajas concentraciones. Las normas CAPRE no establecen un valor máximo admitido para agua potable, aunque la normativa ambiental de INAA (2000) establece como máximo admitido de 5 000  $\mu\text{g.l}^{-1}$ . En base al valor establecido por esta normativa, las concentraciones detectadas en todos los sitios muestreados, no ocasionan problemas.

#### ➤ **Manganeso (Mn)**

El **Mn** en concentraciones cuantificables con el método analítico empleado se localizó en un solo punto de los pozos muestreados, en el PE-09 con una concentración de 40.2  $\mu\text{g.l}^{-1}$  (Tabla 10 b y Figura 28) en el resto de puntos el valor está por debajo del límite de detección (39.6  $\mu\text{g.l}^{-1}$ ).

En los minipiezómetros instalados sólo en el MP-07 ubicado en la zona de descarga excede al valor máximo admitido para el agua potable por la norma CAPRE de 500  $\mu\text{g.l}^{-1}$  con 628.8  $\mu\text{g.l}^{-1}$  en la época de verano. Sin embargo, para la temporada de invierno, las concentraciones aumentaron significativamente tanto en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga como los perforados en el basurero (con un rango de concentraciones de 103.0 a 2466.0  $\mu\text{g.l}^{-1}$ ).

En invierno las concentraciones observadas en la zona de descarga, generan problemas ya que cuando las concentraciones son mayores a  $150 \mu\text{g.l}^{-1}$  provocando un sabor desagradable y al usarla para lavar mancha la ropa, sanitarios y provocan manchas e incrustaciones de coloración oscura en las tuberías (OPS, 1987).

La dinámica de las concentraciones del **Mn** en lagos y ríos de Norteamérica, Europa y la URSS van desde 1 a  $600 \mu\text{g.l}^{-1}$ . Esto indica que se encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente, lo que le facilita su transportación a través de partículas de polvo. Los niveles altos son comunes encontrarlos en aguas subterráneas cuando se presenta un ambiente anaeróbico (OPS, 1987). Es probable que las altas concentraciones encontradas en el MP-07 se deba a las condiciones reducidas que pudieran existir en este punto por la presencia de amonio y de carbono orgánico disuelto ( $363.51 \text{ mg.l}^{-1}$ ) que podrían estar siendo degradados por las bacterias, ocasionando la condición de anoxia en este proceso.

El **Mn** es un elemento esencial en el humano y está catalogado como el menos tóxico; por lo cual no se conocen casos de intoxicación crónica por su consumo a través del agua potable (OPS, 1987).

#### ➤ **Mercurio (Hg)**

Las concentraciones de **Hg** en pozos y minipiezómetros muestreados en verano son menores al límite de detección del método analítico ( $0.009 \mu\text{g.l}^{-1}$ ). Estos valores no representan ningún riesgo para los consumidores ya que el valor máximo admitido para el agua potable por la norma CAPRE es de  $1 \mu\text{g.l}^{-1}$ . Las concentraciones consideradas naturales en el agua son de  $0.2 \mu\text{g.l}^{-1}$  (OPS, 1987). Por estos resultados obtenidos no se realizaron muestras de este metal para invierno (Tabla 10 b).

# Caracterización de la estela de contaminación del basurero La Joya en Granada

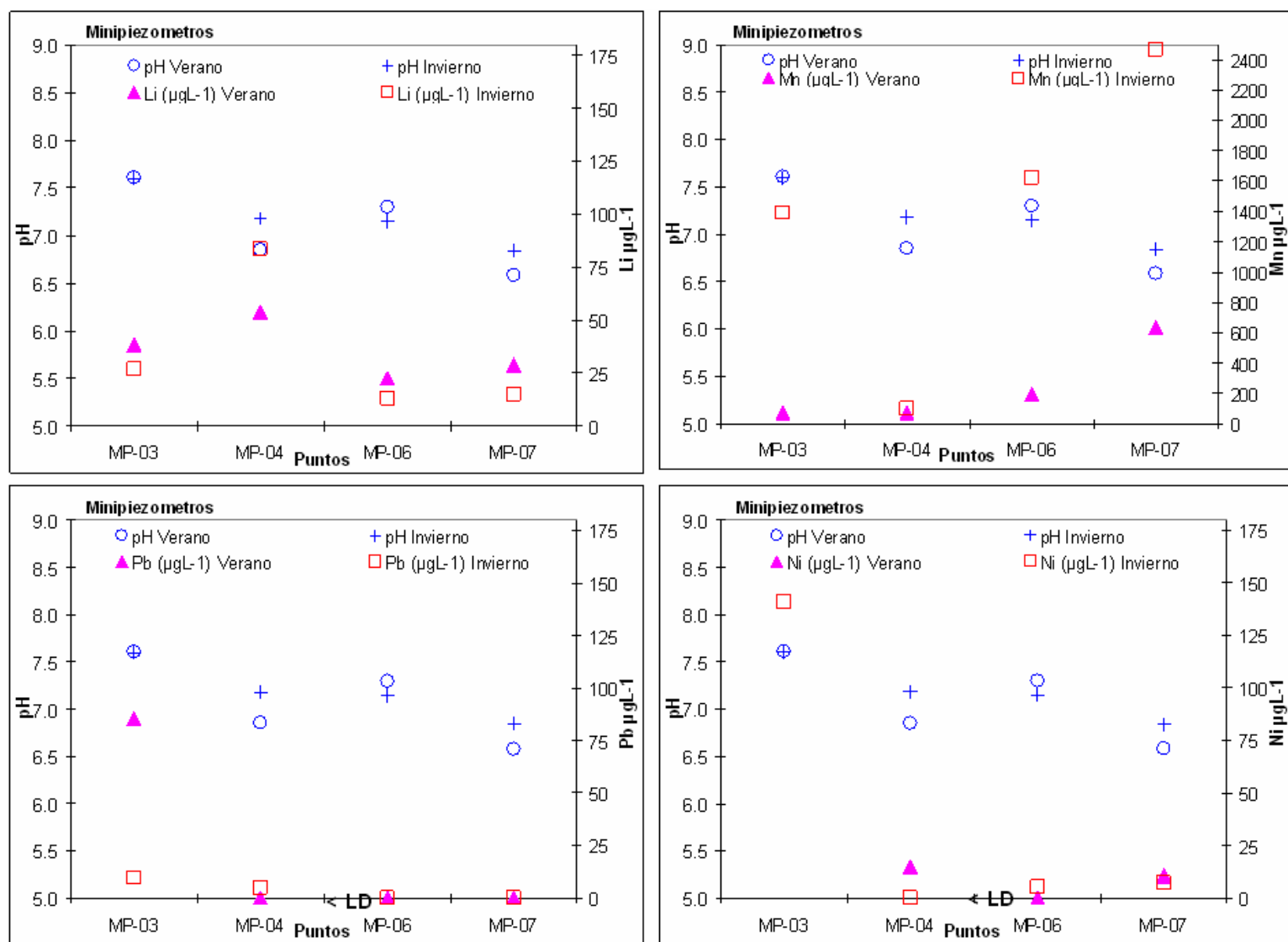


Figura 28. Concentración de metales (en µg/L) pesados Litio (Li), Manganeseo (Mn), Plomo (Pb) y Níquel (Ni) cuantificados en minipiezómetros ubicados en el basurero (MP-03) y en la zona de descarga (MP-04, MP-06, MP-07).

➤ **Níquel (Ni)**

Las concentraciones de **Ni** en 13 puntos de los 18 muestreados están por debajo del límite de detección del método que es  $5 \mu\text{g.l}^{-1}$ ; de los cuales, 12 puntos fueron en pozos y 1 minipiezómetro (Tabla 10 b). Los sitios en que se detectaron concentraciones de Ni, fueron el PP-01 ubicado en la zona de descarga, es el que presentó  $22.89 \mu\text{g.l}^{-1}$  y los minipiezómetros MP-03 ubicados en el basurero con  $333.0 \mu\text{g.l}^{-1}$  y MP-02 con  $353.0 \mu\text{g.l}^{-1}$ . Los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga MP-04 y MP-07 se les cuantificó concentraciones menores a las detectadas en el basurero, de  $14.97 \mu\text{g.l}^{-1}$  y  $10.53 \mu\text{g.l}^{-1}$  respectivamente; valores inferiores al máximo admitido por la norma CAPRE de  $50 \mu\text{g.l}^{-1}$ . (Figura 28).

Las concentraciones reportadas en el basurero son altas si los comparamos con las normas CAPRE de agua potable. La presencia de este elemento y el aumento de las concentraciones en las aguas subterráneas, es causa de su empleo en la industria. Por lo general los niveles naturales de **Ni** en el agua oscilan entre 5 y  $20 \mu\text{g.l}^{-1}$ ; raramente superan estos valores, como es el caso de la URSS en donde se encontraron niveles hasta de  $130 \mu\text{g.l}^{-1}$  en las aguas subterráneas (OPS. 1987).

Las concentraciones determinadas en los lixiviados del basurero podrían estar asociadas a la deposición de materiales que contienen este elemento, lo que indicaría su llegada sitio del basurero como desecho de origen industrial al ser empleado en aleaciones, revestimiento y laminación de metales, catalizadores, ciertos tipos de fungicidas y baterías recargables.

➤ **Plomo (Pb)**

Las concentraciones de **Pb** en el agua subterránea, tanto de pozos como en minipiezómetros ubicados en la zona de descarga están por debajo del límite de detección del método analítico ( $4.64 \mu\text{g.l}^{-1}$ ). Los lixiviados del basurero (MP-02 y

MP-03) son los que presentan concentraciones altas, superiores a los límites máximos admisibles si se tratara de un agua potable de acuerdo con las normas CAPRE de  $10 \mu\text{g.l}^{-1}$  (Tabla 10 b). La concentración promedio encontradas en los lixiviados fue de  $72.14 \mu\text{g.l}^{-1}$  en verano, con disminución en invierno de hasta  $10.06 \mu\text{g.l}^{-1}$ , que podría ser originado por efecto de dilución y cambios de pH al incorporar agua de precipitación.

El **Pb** es un metal común en la naturaleza, se encuentra formando parte de rocas y minerales, los que son incorporados al agua y aire a través de la desgasificación natural de la corteza terrestre, por lo tanto las concentraciones consideradas naturales en el agua son de 1 a  $10 \mu\text{g.l}^{-1}$  (OPS, 1987). Las concentraciones superiores a lo normal que se encontrarían en el ambiente son originadas por la quema de combustibles fósiles y mediante los procesos industriales en donde son empleados para fabricar productos, materias primas, baterías y otros artículos.

Las altas concentraciones de plomo encontradas en los lixiviados del basurero probablemente sean generadas por los desechos de acumuladores de plomo que son llevados al basurero ya que en el país no existe cultura ni la infraestructura apropiada para la separación y reciclaje de baterías desechadas.

Para ultimar, podemos decir que el **Cd, Zn, Cu, Cr, Li, Ni y Pb** presentaron el mismo patrón de comportamiento, en donde se observa, una leve disminución de sus concentraciones en invierno, aparentemente se da una ligera dilución de estos metales por efecto de las precipitaciones, la cual provoca que estos metales sean adsorbidos y retenidos por el suelo. Se tendría que hacer un monitoreo mensual junto con el registro mensual de precipitación en el área de estudio, para valorar estas fluctuaciones.

El **Mn** es el único elemento que presentó aumento en las concentraciones en todos los minipiezómetros muestreados de la época seca a la lluviosa. Este elemento se incorpora al agua en presencia de aguas ácidas causada por ácido carbónico, compuestos orgánicos o aguas contaminadas que generan medios reductores (Custodio & Llamas, 2001). Esto podría ser la evidencia esperada de

que los contaminantes que están en esta área y que se considera que viajan a la misma velocidad del agua (ya que son transportados en ella) sean provenientes del basurero.

A nivel general podemos decir que las concentraciones de los metales pesados (con excepción del **Al**) analizados en el agua subterránea de pozos del área de Granada no superan los valores máximos admitidos por las normas CAPRE. En cuanto a las concentraciones de metales pesados encontradas en los lixiviados, se puede aseverar que son similares a las reportadas en otros basureros.

Tomando en consideración la dinámica del agua subterránea a través de las líneas de flujo y las concentraciones de los contaminantes, aparentemente hay dos fuentes que podrían estar influenciando la calidad del agua subterránea: la primera son los residuos de lixiviados del basurero La Joya que llegan vía arrastre pluvial por el arroyo que baja por la zona sureste del basurero pasando por costado norte del cerro Posintepe (Figura 1) e internándose en la zona de descarga de la costa del lago. La segunda, sería por los residuos generados en la industria curtidora ubicada a unos 800 m al noroeste de basurero, la cual hacen su deposición final de desechos líquidos en el cráter (Hoya volcánica) ubicado en el costado norte del basurero La Joya, residuos que por su origen en el proceso de curtido de cueros cuentan con altos contenidos de sales sulfatadas, sodio y cromo así como también aguas con pH bajos por los ácidos empleados; los cuales, al ser incorporados al agua subterránea cambian el pH del agua, el contenido de oxígeno disuelto (que propicia sistemas anóxicos) y presentan condiciones reductoras (potencial de oxidación-reducción, Eh) que favorecen la presencia de iones metálicos en su especie más tóxica al medio hidrogeológico y hacerlos más móviles en el agua subterránea. Estudios han encontrado que la solubilidad de algunos metales como cadmio, es controlada por pH menores a 6.5 y Eh superiores a 0.2 (Tarradellas et al., 1996); situación que se presenta muy ligeramente en los puntos muestreados.



#### **4.6 Los resultados encontrados en este estudio son los siguientes:**

##### **Suelos**

Las características de los suelos permiten que la materia orgánica lixiviada, que es generada en el basurero, tenga una distribución vertical y horizontal a lo largo del gradiente hidrogeológico e hidráulico natural.

En el área de estudio se identificaron dos zonas con diferentes tipos de suelos:

- Una de las zonas, está ubicada en el área del campo de pozos El Escudo al noreste del basurero. Esta zona se caracteriza por un alto contenido de arcilla (probablemente rica en Al, Fe, y Si) y por una elevada permeabilidad secundaria, la cual, representa un riesgo asociado a la infiltración de sustancias contaminantes. La acumulación y migración de estas sustancias a través del medio podría tener lugar debido a las propiedades absorbentes de las arcillas y por la presencia de grietas de disecación formadas en verano.
- La otra zona, está localizada en el sector del basurero La Joya. Se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica y suelos con propiedades granulares variadas lo que le permite una buena permeabilidad. El riesgo de contaminación es alto dado las características de la zona, que propician la retención (absorción y adsorción) de los contaminantes, que una vez transformados por la actividad bacteriana se dirigen hacia la zona saturada.

Las tasas de infiltración que se presentan en el área de estudio corresponden a suelos de tipo limo-arenoso a arenosos; lo cual permite que el 88% de la precipitación se infiltre. Esto confirma que esta área corresponde a la zona donde se presenta la mayor recarga del acuífero.

## **Hidrogeología**

Los niveles piezométricos inician desde los 3 m debajo del terreno en la zona de descarga a orillas del lago Cocibolca hasta los 152 m en pozos de la parte alta de la zona de estudio cercanos a la laguna de Apoyo, que comprende la zona de recarga. Esta información permitió identificar la dirección de los flujos subterráneos, los cuales fluyen desde la zona de la laguna de Apoyo hacia el Lago Cocibolca en dirección oeste - este y desde la parte alta del Volcán Mombacho en dirección noreste hacia la zona de descarga en el Lago Cocibolca.

Los niveles dinámicos medidos en los campos de pozos de ENACAL (El Escudo y Quinta Ena), muestran que el gradiente hidráulico se está ejerciendo hacia el campo de pozos Quinta Ena, en donde se presentan mayores abatimientos ejercidos por el bombeo. A mediano plazo, esta situación podría crear conos de influencia en las áreas circundantes en dirección del basurero y coincidentes con las líneas de flujo que vienen desde ese sector, lo que podría agilizar la migración de la estela de contaminación originada en el basurero.

## **Geología y Geofísica**

Las secciones geoelectricas realizadas en los alrededores del basurero La Joya, reflejan dos zonas claramente diferenciadas: una con resistividad menor a 22 Ohm-m asociada a la anomalía generada por los lixiviados y con dirección oeste – este; y otra que contrasta a la primera cuya resistividad supera los 100 Ohm-m y que corresponde al medio hidrogeológico.

Los sondeos eléctricos (SEVC) permitieron determinar la presencia de los lixiviados en unos 50 m de espesor de la zona no saturada en el área del basurero. Esta contaminación podría incrementarse con el aumento en la cantidad de residuos generados por el crecimiento poblacional y por la evolución del consumo de productos que generan residuos de mayor impacto ambiental.

La estela de contaminación producida por los lixiviados del basurero se extiende desde el basurero en dirección a la costa del lago Cocibolca. Se estima que la estela de lixiviados tiene un espesor aproximado de 10 m causada por la dispersión superficial y subsuperficial de los mismos.

Aparentemente la estela de lixiviados está movilizándose en el medio hidrogeológico a través de la falla geológica que está asociada a estas hoyas volcánicas y que tiene dirección sur - sureste. El transporte preferencial realizado a través de fallas, hace que la velocidad de flujo de los lixiviados sea mayor, que la que se da en condiciones naturales en el medio hidrogeológico.

### **Hidrogeoquímica y lixiviados**

Se estimó la velocidad lineal promedio que podría alcanzar el transporte de lixiviados (movimiento advectivo) en el medio hidrogeológico y es de 0.168 m/d; tomando en cuenta propiedades teóricas establecidas para medios hidrogeológicos similares a los del área de estudio; y sin tomar en cuenta la influencia que podrían tener las fallas geológicas que existen en el área y el bombeo de los campos de pozos de ENACAL.

La producción estimada de líquidos lixiviados es de 532.4 mm/año (11,573.22 m<sup>3</sup>/año), con un promedio diario de 31.7 m<sup>3</sup>/día; que en su mayor parte se incorporan a la zona no saturada del medio hidrogeológico, ya que no existe un sistema de recolección y almacenamiento para estos.

El agua subterránea en la zona de estudio es del tipo bicarbonatada-cálcica-sódica. Son aguas someras cuando son bicarbonatadas-cálcicas y cuando pasan a bicarbonatada-sódicas son aguas más profundas. Esto es típico de aguas jóvenes y de origen meteórico, es decir, de reciente infiltración y con dominio de sales de sodio, debido a la estabilidad de este ión.

Las concentraciones de los iones disueltos en el agua subterránea son similares a las concentraciones reportadas para aguas subterráneas no contaminadas; a excepción de las aguas en los minipiezómetros MP-04 y MP-07 ubicados en la zona de descarga, donde las concentraciones de calcio, potasio, flúor y sulfatos exceden los límites máximos admisibles establecidos por las normas CAPRE (1994) para agua potable.

El patrón de distribución de los cloruros, conductividad, potasio, sodio y sólidos totales disueltos es similar, se presenta un gradiente marcado hacia la zona de descarga en el lago Cocibolca.

Es probable que los cloruros cuantificados en el campo de pozos **El Escudo** sean producto de la influencia del flujo subterráneo que llega desde la hoya volcánica en donde REPTINIC depositó sus aguas residuales con altos contenidos de sales, ya que estos pozos presentan altas transmisividades.

Las concentraciones de cloruros observadas en el minipiezómetro 4 (MP-04) aumentaron en la época de invierno; probablemente se deba a la mayor cantidad de lixiviados producidos en esta época, ya que cuando hay más precipitación hay mayor producción de lixiviados. En adición, en esta estación pueden incorporarse mayor cantidad de sales proveniente del lavado de los desechos depositados por la curtiembre REPTINIC en el basurero.

Las conductividades (asociadas a los iones conservativos) medidas en el basurero son altas ( $14,990 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) y presentan gradientes marcados en el sector de los minipiezómetros instalados en la zona de descarga.

Las concentraciones de hierro en el agua subterránea y en los minipiezómetros de la zona de descarga son similares; sobrepasan el valor establecido por las normas de agua potable; se destaca el MP-07 para ambas época de muestreo. En este punto la condición química presente en el agua, es reducida. Aunque en pozos como el PP-02, es muy probable que el alto contenido de hierro se deba a liberación del hierro por la oxidación del encamisado del pozo.

La presencia de las especies del nitrógeno ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), tanto en verano como en invierno, evidencia que el acuífero está siendo impactado por las diversas actividades antropogénicas que se dan en el área de estudio; las que incluyen desechos domésticos, fosas/tanques sépticos, letrinas, fertilizantes nitrogenados y ganado.

Las concentraciones de nitratos en el pozo PP-05 de ENACAL con valores cercanos al límite máximo admisible por la norma CAPRE probablemente se deba a la afectación que están ejerciendo los residuos originados en los pozos sépticos de los asentamientos ubicados al oeste de este pozo.

Las concentraciones de amonio que superan el valor máximo admitido por las normas CAPRE para el uso de agua potable en los pozos ubicados en áreas con influencia de corrales, evidencian estados de desnitrificación de compuestos orgánicos por la actividad bacteriana y de las condiciones reductoras presentes en el acuífero.

### **Carga de contaminantes**

Las concentraciones de  $\text{DBO}_5$ , DQO y COD encontradas en los minipiezómetros ubicados en la zona de descarga indican la presencia de compuestos orgánicos provenientes de fuentes externas. La descomposición de esta materia orgánica forma compuestos húmicos, que dan coloración al agua, reducen el contenido de oxígeno y crean condiciones reductoras en el acuífero.

La presencia en el acuífero de sustancias húmicas que llegan a la zona de descarga subterránea, podría facilitar la incorporación de iones como los metales pesados al agua subterránea, debido a que su presencia esta asociada a pH bajos.

La deposición de desechos industriales en el basurero y los residuos derivados del petróleo proveniente de gasolineras podría ser el origen de la presencia de fenoles, aceites y grasas en el MP-07.

La relación  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  observada en ambas épocas de muestreo está en el rango de 0.1 a 0.3 que significa un estado avanzado de los procesos de degradación y es un indicativo de la presencia de lixiviados maduros.

Las concentraciones de metales pesados analizados en el agua subterránea no superan los valores máximos admitidos por las normas CAPRE. Sin embargo, en los minipiezómetros instalados en la zona de descarga se presentan ligeros aumentos en las concentraciones, probable evidencia de que están siendo contaminados por los lixiviados del basurero y residuos de la curtiembre.

Las concentraciones de metales pesados y de los parámetros físico –químicos medidos en los lixiviados están dentro del rango de los valores encontrados en estudios hechos en rellenos sanitarios, sin embargo estos tienden a aumentar por la acumulación de basura a lo largo de los años.

## **5. CONCLUSIONES**

1. Las características hidrogeológicas presentes en el área de estudio permiten que se de una dispersión longitudinal y transversal de las sustancias lixiviadas a lo largo del gradiente hidrogeológico.
2. El empleo de metodologías combinadas, como: Geofísica, Geología, Hidrogeología y Geoquímica aplicadas en el estudio permitió identificar dos zonas en el sector del basurero La Joya: una de ellas, con resistividades bajas y la otra con altos valores. La primera se encuentra asociada a la anomalía generada por los lixiviados cuya dirección es hacia el este (E) del basurero, en dirección al Lago Cocibolca y la segunda corresponde a las propiedades propias del medio hidrogeológico donde se encuentra el basurero La Joya.
3. La explotación del agua subterránea a través del bombeo en los pozos de ENACAL está provocando un marcado gradiente hidrogeológico hacia la zona de descarga, en especial, en el campo de pozos Quinta Ena, que podría acelerar la migración de los lixiviados presentes en el medio hidrogeológico.
4. Las concentraciones de iones disueltos y metales pesados en el agua subterránea son comparables a las concentraciones de aguas subterráneas no contaminadas, exceptuando los puntos habilitados para la obtención del agua subterránea en la zona de descarga (minipiezómetros) que se encuentran en las mismas líneas de flujo subterráneo que vienen desde el basurero.
5. La concentración de cada parámetro físico-químico y metal pesado analizado en los lixiviados se pueden comparar a los encontrados en estudios realizados en rellenos sanitarios de Latinoamérica; sin embargo, el basurero La Joya tiende a concentrar los contaminantes en el medio

hidrogeológico por acumulación de basura a lo largo de los años e incorporarlos al agua subterránea cuando haya pH bajos y así permitir su movilidad.

6. Las concentraciones de los parámetros físico – químicos analizados en el agua subterránea de los pozos de ENACAL, donde la población se abastece de agua potable están dentro de los rangos establecidos por las normas regionales CAPRE (1994) para agua de consumo humano.



## **6. RECOMENDACIONES**

### **Recomendaciones para profundizar el monitoreo de la evolución de la basura y lixiviados**

1. Monitorear el tipo y cantidad de desechos que están llegando al basurero.
2. Valorar la viabilidad de remediación y/o confinamiento apropiado de los lixiviados para mitigar la contaminación a que se encuentra sometido el acuífero de Granada y así disminuir el riesgo de contaminación a que se encuentran los campos de pozos de ENACAL.
3. Dar seguimiento a la contaminación del acuífero donde la población de Granada obtiene el agua potable, mediante la instalación de minipiezómetros multiniveles en áreas próximas al basurero y en la dirección del flujo subterráneo, con el objetivo de monitorear los lixiviados que podrían estar incorporándose en el agua subterránea. A la vez incluir pozos que pueden llegar a afectarse y el arroyo que pasa al sur del basurero por la posibilidad de que este arrastrando los lixiviados que escurren superficialmente al Lago Cocibolca.
4. Para delimitar en su totalidad la estela de contaminación elaborar SEVC complementarios a los realizados en este estudio, los que se ubicarían en el sector medio de la zona y en el área de descarga.
5. Analizar los derivados del petróleo y sus metabolitos de degradación ya que las gasolineras depositan sus residuos en el basurero. Es recomendable para el análisis de fenoles metodologías sensibles a las concentraciones bajas (como la cromatografía), ya que estos compuestos son nocivos para la salud a esas concentraciones.
6. Caracterizar los residuos del agua residual de la curtiembre para valorar la carga contaminante y su afectación que podría llevar al medio hidrogeológico de la zona.

7. Realizar estudios de la contaminación atmosférica ocasionada por la amplia diseminación de contaminantes volatilizados en la combustión de la basura así como la afectación que se está provocando a la población.
8. Determinar la movilidad y la dirección del flujo preferencial de los contaminantes en el medio hidrogeológico mediante modelación matemática.
9. Determinar zonas de recarga por medio de análisis de  $^{18}\text{O}$  y deuterio con el fin de ubicar la procedencia del agua subterránea.
10. Colectar muestras de lluvia y realizar análisis físico – químicos en un lapso de 1 año para conocer la composición del agua que entra al sistema.
11. Tomar muestras del Lago Cocibolca en la zona de descarga por 1 año, en transectos longitudinales y transversales para conocer la composición química del agua que se mezcla con el agua subterránea.
12. Determinar la relación agua superficial y subterránea mediante la instalación de minipiezómetros y seepages en los arroyos de la zona en verano e invierno.

### **Recomendaciones para el Municipio de Granada**

13. Elaborar e implementar un plan de manejo y deposición de los residuos sólidos en el basurero, mientras se cuenta con un nuevo sitio para la disposición de la basura, con el fin de disminuir la dispersión de la basura en las propiedades aledañas al basurero y evitar un aumento de caudal de lixiviados que puedan dispersar superficialmente.
14. Recomendar a los pobladores la eliminación de corrales, baños, lavaderos, letrinas y fosas sépticas que tengan alrededor de los pozos para evitar la contaminación por nitratos, sulfatos, grasas etc. que podrían dañar la calidad del agua de consumo humano.

15. Implementar un plan de educación ambiental para la ciudad de Granada en coordinación con la alcaldía, MED, ONG's y universidades para hacer una mejor disposición de la basura y con ello contribuir a la protección de los recursos hídricos de la cuenca de mayor importancia en Nicaragua.
16. Crear un nuevo relleno sanitario al norte de la ciudad de Granada, que cumpla con las normas medioambientales, que deberá contemplar el reciclaje de los desechos aprovechando programas como **“la basura es un tesoro”**, implementado por algunas alcaldías del país. Una vez creado, clausurar La Joya de acuerdo a las normas y técnicas establecidas para rellenos sanitarios.

## 7. **Bibliografía**

1. Appelo C.A.J., Postma D. 1999. Geochemistry Groundwater and Pollution. Fourth corrected print. A.A. Balkema, Totterdam. 535 pág.
2. Basberg, L., Banks, D., Saether, O. 1998. Redox Processes in Groundwater Impacted by Landfill Leachate. Aquatic Geochemistry 4: 253-272. 1998 Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
3. Bautista G., L. F. & Timoshina L., T. 2005. Descomposición de materia orgánica recalcitrante en lixiviados pretratados de rellenos sanitarios por medio de procesos de oxidación avanzada. Instituto Politécnico Nacional. México. Consultado en: <http://termo.esiquie.ipn.mx/seminarios/LuisFelipe21.pdf> Fecha de consulta 15 de Abril 2005.
4. Brandstetter, A., Sletten R. S., Mentler A. and Wenzel W.W. 1996. Estimating Dissolved organic carbon in natural waters by UV absorbance (254 nm). Z. Pflanzenernähr Bodenk., 159, 605 – 607
5. Bengtsson, G., & Picado, F. 1993. Transport and distribution of mercury in a gold miner's river in Santo Domingo Chontales Nicaragua (sin publicar)
6. CAPRE. 1994. Norma Regional de Calidad del Agua para Consumo Humano. Comité coordinador regional de instituciones de agua potable y saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana.
7. Cárdenas L. J. 1996. Impacto del Basurero de Navarro Sobre las Aguas Subterráneas en Cali, Colombia. Ministerio de Minas y Energía Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química. 128 Pág.
8. Castillo, J., Rodríguez, D., Rivera, A., Zamorano, G., Acuña, H., 2000. Uso de tecnologías limpias experiencias prácticas en Chile. Ministerio de Economía. Proyecto producción limpia SEPL-GTZ.
9. CEPIS, 2000. Rellenos Sanitarios y Tratamiento de Residuos Líquidos de Mataderos Municipales. Por Ing. Miguel Balladares Altamirano. Consultado en: [www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/resisoli/rellenos/rellenos.html](http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/resisoli/rellenos/rellenos.html) Fecha de consulta: 10 marzo 2006.
10. CIRA, 1995. Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA). 1995. Proyecto Generación de las

Bases Científico Técnicas y Sociales para la  
Formulación de un Plan de Saneamiento de Granada y su  
Área de Influencia. 657 Pág.

11. CIRA & PROCÓN SUL Ingenieros S. A., 1995. Centro Para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua. Estudio del Manejo de los Desechos Sólidos de la Ciudad de Granada. 111 Pág.
12. CIRA & CARA, 2003. Curso Corto “PRACTICA DE CAMPO EN HIDROGEOLOGÍA” 03 al 07 Noviembre 2003.
13. Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América. Mayo 2001. Consultado en: [www.sam.usace.army.mil/en/wra/Nicaragua/WRA%20SPANISH H.pdf](http://www.sam.usace.army.mil/en/wra/Nicaragua/WRA%20SPANISH.pdf) Fecha de consulta 10 marzo 2006
14. Custodio E. Llamas M. 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega S.A., Barcelona. Primera Edición. Tomo I y II
15. Custodio E. Llamas M. 2001. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega S.A., Barcelona. Segunda Edición. Tomo I y II
16. Dahlin T., 1993. 2D Resistivity Surveyingn for environmental and engineering applications. First Break 14, 7 :275 - 283
17. Denyer, P., Kussmaul, S. 2000. Geología de Costa Rica. Ed. Universidad de Costa Rica. 515 Pág.
18. Ehrig Hans-Jürgen, 1999. Cantidad y Contenidos de Lixiviados de Rellenos de Desechos Domésticos. CEPIS/OPS. CEPIS/OPS. Consultado en: <http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/curso/cantidad/cantidad.html> Fecha de consulta 01 noviembre 2001.
19. Espinoza R., M. M. 1999. Estudio Hidrogeológico del Acuífero Granada Departamento de Granada, Nicaragua. Tesis de Maestría en Geología, Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. 140 Pág.
20. FAO, 1977. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Guía para la Descripción de Perfiles de Suelo. Roma. Segunda Edición. 70 Pág.
21. Fenzl N. 1989. Nicaragua: Geografía, clima, geología e Hidrogeología. Belem, UFPA/INETER/INAN, 1988. 62 Pág.
22. Ferrey O. C.J. & Williams, R. L. 1971. Mapa Geológico. Hoja 3051 IV. Serie E751. Impreso Instituto Geográfico Nacional. Managua, Nicaragua.

23. Fetter C. W. 1993. Contaminant Hydrogeology. 2th. Ed. Prentice Hall. 500 pag.
24. Griffiths D.H. and Baker R. D., 1993. The use of multi-electrodes resistivity imaging in gravel prospecting. Journal of Applied Geophysics, 49, 245-254.
25. Hecht, G. 1995. INETER. Hidroquímica de la Zona Pacífica de Nicaragua. Notas explicativas sobre el mapa hidroquímico y el mapa de riego de las hojas Chinandega, Managua y Granada. Escala 1: 250000. INETER.
26. Hem, J., D., 1989. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Third Edition. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. USGS.
27. Hodgson, V. G. 1998. Fundamentos de Geología. Relativo a Nicaragua. Managua, Nicaragua tercera Edición. 194 Pág.
28. Howard, 1997; en Llamas R., and Custodio, E., 2001. Intensive Use of Groundwater. Challenges and Opportunities.2001.
29. INAA, 2001. NORMAS TÉCNICAS PARA EL ABASTECIMIENTO Y POTABILIZACIÓN DEL AGUA. Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados, Ente Regulador. 150 Pág.
30. INAA, 2000. NORMATIVA AMBIENTAL. Norma para la clasificación de los recursos hídricos. Pág. 10
31. INEC, 2003. Instituto Nicaragüense de Estadísticas y Censos. Estimaciones y Cálculos de la Dirección de Estadísticas Socio-Demográficas basados en INEC-CELADE Doc. Inédito "Nicaragua: Estimaciones y Proyecciones de Población 1950-2050. Septiembre 1999.
32. INEC, 2005. VIII Censo de población y IV de vivienda. Cifras oficiales. Censos Nacionales, 2005. Nicaragua, Mayo 2006, en pdf.
33. INETER, 1971. Mapas y descripción de tipos y usos de suelos de Granada, 1:20000
34. INETER, 1988. Hojas topográficas; Granada, Masaya, Nandaime e isla Zapatera Números 3051-IV, 2951-I, 2951-II, 3051-III.
35. INETER, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 1995. Atlas escolar de Nicaragua. Segunda edición. 32 Pág.
36. I NETER, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, 1998. Informe Final. Estudio de Mapificación Hidrogeológica e

- Hidroquímica de la Región Central de Nicaragua. Dirección de Recursos Hídricos, Dirección de Hidrogeología. 170 Pág.
37. INETER & Český Geologický ústav Praha 1998. Estudio Geológico para reconocimiento de riesgo natural y vulnerabilidad geológica en el área de Granada y Masaya. Peter Hradecky, Havlicek P; Novak Zd; Stanik E; Mlcoch V; Sebesta J; Buitrago N; Navarro M.
  38. Krásný J., Hecht, G., INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales) 1998. Estudio Hidrogeológico e Hidroquímico de la Región del Pacífico de Nicaragua. Dirección de Recursos Hídricos, Departamento de Hidrogeología.
  39. Kreeith, F. 1994. Handbook of solid waste management. Ed. Mcgraw-Hill 15- 20 Pág.
  40. KOKUSAI KOGYO CO. LTD. 1997. Estudio sobre el mejoramiento de condiciones sanitarias urbanas de las principales ciudades de la república de Nicaragua (León, Chinandega y Granada). Vol. III
  41. Llamas, R., & Custodio, E., 2001. Intensive Use of Groundwater Challenges and Opportunities. Ed. A.A. Balkema Publishers Lisse/Abingdon/Exton (PA)/tokio. 478 Pág.
  42. Losilla, M., Rodríguez, H., Schosinsky, G., Stimson J., Bethune, D. 2001. LOS ACUÍFEROS VOLCÁNICOS Y EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN AMERICA CENTRAL. ED. Universidad de Costa Rica. 205 Pág.
  43. Miletto, M., Pogliano, G., Maspla, J., Lanza, R. & Zuppi, G.M. 1997. Identificación de la contaminación de las aguas subterráneas derivada de un vertedero de residuos sólidos urbanos por métodos geoeléctricos. Consultado en: [http://aguas.igme.es/igme/publica/pdf\\_geofi/39a.comunicacion.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/pdf_geofi/39a.comunicacion.pdf) Pág. 371 – 375 Fecha de consulta 19 Junio 2005.
  44. Miliarium Aureum, S.L. (c) 2001, 2004. Características de los lixiviados de un vertedero consultado en: <http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Vertidos/Variacion.htm> Fecha de consulta 25 abril 2005
  45. Montgomeri-Chan, 1981. INAA, Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados. Informe sobre Investigación de Fuentes Potenciales de Abastecimiento de Agua para Managua. Fase II. Consorcio.
  46. Moore, J. & Rammaoorthy, S. 1984. Heavy Metals in Natural Waters. Applied Monitoring and Impact Assessment. Ed. Robert S. DeSanto. 269 pag.

47. OPS. 1987. Organización Panamericana de la salud. Guía para la calidad del agua potable. Vol.2 Criterios relativos a la salud y otra información.
48. OPS, 2003. evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales, informe analítico de la republica dominicana Dic/2003.
49. Patzelt, A., Waldhör, M., Greiner, B. 2005. Terrana Geophysik Co. Consultado en: <http://www.terrana-geophysik.de/index.html> Fecha de consulta 04 Agosto 2005.
50. PNO. Procedimiento Normalizado de Operación de la Preservación de Parámetros Físico Químicos. CIRA – UNAN – Managua. Dpto. de Hidroquímica y Micropoluentes.
51. PROCONSUL S.A. 1996. Estudio del Manejo de los Desechos Sólidos de la Ciudad de Granada. 111 Pág.
52. Programa de Naciones Unidas, 1973. Investigaciones de Aguas Subterráneas en la Región del Pacífico de Nicaragua, En Área Managua-Granada. 105 pag.
53. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Departamento Nacional de Acueductos y Alcantarillados (DENACAL), Servicio Geológico Nacional (S.G.N). 1973. Selección del Futuro Campo de Pozos para el Abastecimiento de Agua de la Ciudad de Granada. (NIC-73/007).
54. Quadri de la Torre G., Wehenpohl, G., Sánchez, J., López, A., Nyssen A., 2003 La basura en el limbo. Desempeño de gobiernos locales y participación privada en el manejo de residuos urbanos, México. Proyecto de apoyo a la gestion de residuos sólidos en el estado de México. GTZ. 108 Pág.
55. Rodier, J., 1981. Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales, Aguas de mar. Ed. OMEGA 1059 Pág.
56. Rossin, A., Teixeira, P. F., Zepeda, F., 1998. Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América latina y el caribe. Publicación conjunta del BID y OPS – OMS. Segunda edición. Septiembre 1998. Serie ambiental No. 18. Tomado de sitio web de CEPIS, enero 2005.
57. Sánchez, P. 1981. Suelos del trópico características y manejo. Departamento de la Ciencia del Suelo. Universidad Estatal de



- Carolina del Norte. Raleigh, EUA. Primera edición en español por IICA. 634 Pág.
58. Sequeira, L., 2005. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. CIGEO. Geofísica I. Principios básicos, prospección eléctrica.
  59. Schosinsky G. & Losilla M. 2000. Revista Geológica de América Central. No. 23. Universidad de Costa Rica. Diciembre 2000. Ed. Universidad de Costa Rica.
  60. Sussman, D., 1985. Apoyo Caldera, Nicaragua. A Mayor Quaternary Silicic Eruptive Center – Joun. Volc. Geotherm Research 24 pp. 249-282
  61. Suthersan, S. S., 1997. Remediation Engineering Design Concepts. Ed. CRC Lewis.
  62. Tarradellas, 1996. In Kreeith, F. 1994. Handbook of solid waste management. Ed. Mcgraw-Hill 15- 20 Pág.
  63. Tchobanoglous, G., O’Leary P. R. en Kreeith, F. 1994. Handbook of solid waste management. Ed. Mcgraw-Hill, Chapter 12
  64. UGR, 2005. Universidad de Granada. Instituto Andaluz de Geofísica. Consultado en: <http://www.ugr.es/~geofisic/electrica/electrica.html> Fecha de consulta 04 agosto 2005.
  65. Vitores, T. 2005. Informe interno por Juan Tomás Vitores Cabrera. Ing. Industrial Centro Canario del Agua. Consultado en: <http://www.fcca.es/Docs/Informe%20fenoles.doc> Fecha de consulta 10 Mayo 2005
  66. Wetzel, R., 1981. Limnología. Ed. Omega S. A., Barcelona. 679 Pág.
  67. Zohdy, A. A. R., & Bisdorf, R. J., 1989. Programs for the automatic processing and interpretation of Schulumberger sounding curves in Quick BASIC 4.0: U.S. Geological Survey Open-File Report, 89-137 A&B, 64 P.

# ANEXO 1

## Datos de Precipitación en la estación pluviométrica 069030 (Granada INA).

58-98

INSTITUTO NICARAGUENSE DE ESTUDIOS TERRITORIALES  
DIRECCION DE METEOROLOGIA

ESTACION: GRANADA INA  
CODIGO: 069030  
PARAMETRO: PRECIPITACION (mm)

LATITUD: 11° 55' N  
LONGITUD: 85° 58' W  
ELEVACION: 50 msnm

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
1958	4	1	0	19	102	262	160	89	189	275	66	6	1173
1959	0	0	0	0	21	288	81	160	177	358	116	4	1205
1960	8	2	1	104	138	318	185	214	359	406	77	2	1814
1961	2	0	0	0	3	180	235	95	335	183	68	9	1110
1962	9	0	0	1	44	388	167	134	338	353	114	0	1548
1963	11	0	3	23	10	328	176	56	122	120	73	1	923
1964	0	0	0	59	94	179	317	198	274	302	0	0	1423
1965	0	0	0	0	90	424	127	66	266	286	9	0	1268
1966	1	3	0	4	270	160	132	194	468	295	0	0	1527
1967	8	1	1	1	38	179	126	103	181	172	132	26	968
1968	0	0	0	0	210	401	113	157	455	32	50	1	1419
1969	6	0	0	13	206	123	150	245	339	323	98	16	1519
1970	11	2	64	19	140	157	230	554	490	336	157	24	2184
1971	58	4	0	3	218	235	190	143	569	246	37	7	1710
1972	5	2	0	0	140	34	78	111	69	60	0	0	499
1973	0	1	0	0	129	74	125	484	197	449	92	6	1557
1974	4	0	0	0	66	266	113	67	311	167	15	59	1068
1975	8	0	0	0	45	60	49	243	522	347	118	3	1395
1976	3	1	0	21	119	359	75	145	112	227	15	8	1085
1977	0	0	0	0	221	191	60	123	208	78	86	12	979
1978	0	0	0	0	113	150	293	349	478	298	48	3	1732
1979	0	0	0	42	88	180	321	124	305	469	104	0	1633
1980	0	0	0	122	245	310	74	103	111	333	321	0	1619
1981	0	0	25	0	373	389	128	138	142	337	17	0	1549
1982	13	0	5	0	566	220	157	101	76	112	49	6	1305
1983	0	0	2	4	0	136	187	196	235	343	24	36	1163
1984	0	0	0	18	59	274	294	188	362	116	28	20	1358
1985	0	0	0	6	75	78	128	211	122	355	101	40	1116
1986	2	8	3	3	289	224	65	139	140	162	59	14	1108
1987	7	3	44	3	74	137	244	246	163	226	33	18	1197
1988	14	9	3	6	186	105	120	302	256	367	19	10	1395
1989	24	20	3	3	37	80	212	235	402	52	99	29	1196
1990	14	7	4	3	205	134	199	70	116	295	24	22	1093
1991	7	3	4	17	154	185	148	194	246	257	69	15	1299
1992	5	3	5	18	152	183	147	196	232	257	70	15	1282
1993	7	0	0	39	108	204	59	273	307	168	87	3	1254
1994	1	4	0	44	122	127	92	83	209	478	132	11	1302
1995	0	0	13	84	77	294	151	381	252	227	71	36	1586
SUMA	233	73	179	677	5228	8017	5907	7109	10134	9866	2676	462	50562
MEDIA	6	2	5	18	138	211	155	187	267	260	70	12	1331
MAXIMA	58	20	64	122	566	424	321	554	569	478	321	59	2184
DSTD	10	4	13	30	111	103	73	111	132	117	59	14	299
CV	167	201	273	166	81	49	47	59	50	45	84	113	22
PREC.%	0.5	0.1	0.4	1.3	10.3	15.9	11.7	14.1	20.0	19.5	5.3	0.9	100.0

**Balance hídrico en el sitio del basurero La Joya en Granada  
(CIRA/PROCONSUL S. A, 1995).**

PARÁMETROS	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	ANUAL
ETP	167	145	153	151	135	132	125	128	135	134	162	166	1733
P	232	225	131	160	273	290	80	16	6	2	3	18	1437
P-ETP	65	81	-22	9	138	158	-45	-112	-129	-132	-159	-148	
ALM	65	100	78	87	100	100	55	0	0	0	0	0	
VAR ALM	65	35	-22	9	13	0	-45	-55	0	0	0	0	
ETR	167	145	153	151	135	132	125	71	6	2	3	18	1108
DA								-57	-129	-132	-159	-148	-625
EA		46	0	0	125	158	0	0	0	0	0	0	329
ESC. SUP.	28	27	16	19	33	35	10	2	1	0	0	2	
INFIL.	204	199	115	141	24	255	70	14	5	2	3	16	
PERC.	0	19	0	0	92	123	0	0	0	0	0	0	234

ETP	Evapotranspiración
P	Precipitación
P-ETP	Precipitación - Evapotranspiración
ALM	Almacenaje
VAR ALM	Variación de almacenaje
ETR	Evapotranspiración Real
DA	Déficit anual
EA	Exceso anual
ESC. SUP.	Escurrimiento superficial
INFIL.	Infiltración
PERC.	Percolación

**Comparación de dos métodos para el cálculo de la cantidad de lixiviados, método propuesto por Ehrig (1999) y el balance Hidrológico elaborado por CIRA/PROCÓNSUL S.A. (1995).**

Estación meteorológica Granada INA

LATITUD: 11° 55' N

LONGITUD: 85° 58' W

ELEVACION: 50 msnm

Serie de datos 1958 - 1995

Estación PP-69030

Ubicación Granada (INA)

Area del basurero La Joya 21737.8

Mes	Precipitación media (mm)	Precipitación (m <sup>3</sup> )	Método Ehrig (mm)	Método Ehrig (m <sup>3</sup> )	Método Balance (mm) Est. Nandaime
Enero	6	133.30	2	53.32	0.00
Febrero	2	41.79	1	16.71	0.00
Marzo	5	102.28	2	40.91	0.00
Abril	18	387.46	7	154.98	0.00
Mayo	138	2990.58	55	1196.23	0.00
Junio	211	4586.02	84	1834.41	19.00
Julio	155	3379.27	62	1351.71	0.00
Agosto	187	4066.58	75	1626.63	0.00
Septiembre	267	5797.07	107	2318.83	92.00
Octubre	260	5644.07	104	2257.63	123.00
Noviembre	70	1530.90	28	612.36	0.00
Diciembre	12	264.39	5	105.76	0.00
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>1330.6</b>	<b>28923.72</b>	<b>532.2</b>	<b>11569.5</b>	<b>234.00</b>

# ANEXO 2

### Inventario de pozos en el área de estudio.

Código	Coordenadas (UTM)		Elevación msnm	Propietario	Ubicación
	X	Y			
PP-01	615618	1315995	61	Gustavo Noguera	FAGANIC Parque de ferias
PP-02	614784	1316593	69	Emilio Chamorro	Hacienda Quinta Ena
PP-03	614549	1316806	74	ENACAL	Quinta Ena No. 3
PP-04	614251	1317177	80	ENACAL	Quinta Ena No. 1
PP-05	614047	1317320	79	ENACAL	Quinta Ena No. 2
PP-06	613926	1317444	81	ENACAL	Quinta Ena No. 4
PP-07	613485	1315317	107	Juan Caldera	Finca San Agustín No. 2
PP-08	613632	1315790	113	Juan Caldera	Finca San Agustín No. 1
PP-09	613830	1316673	106	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-10	613729	1316600	120	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-11	613646	1316757	112	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-12	613529	1316617	99	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-13	613461	1316703	101	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-14	613329	1316584	123	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-15	613321	1316645	107	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-16	613317	1316851	105	PRODEUPANIC	Barrio Pantanal
PP-17	612716	1317113	89	ENACAL	Escudo No. 1
PP-18	612662	1316909	88	ENACAL	Escudo No. 2
PP-19	611981	1317149	117	David Delagneau	Carretera a Nandaime
PP-20	612021	1317057	117	Félix Pérez	Carretera a Nandaime
PP-21	611414	1316921	141	FRUGALASA	La Juguera
PP-22	610976	1316477	138	Policia Nacional	Departamento Procesamiento
PP-23	609803	1316235	188	Sistema Penitenciario	Sistema penal
PP-24	610222	1315450	173	Comunidad Hormigón	El Hormigón
PP-25	610785	1314920	177	Miguel A. Agüello	La Chanchera
PP-26	610210	1312053	295	Comunidad Tepeyac	Tepeyac
PP-27	609022	1314609	202	Dr. Silvio Cuadra	Comunidad el Hormigón
PP-28	611345	1317008	136	FRUGALASA	La Juguera
PE-01	615492	1316128	72	Antonio Jaime Cruz	La Zacatera
PE-02	615269	1315863	91	Cándida Rosa García	Tarila
PE-03	614808	1316580	28	GAISA	Finca Quinta Ena
PE-04	614397	1316810	63	Emilio Chamorro	Finca El Bolero
PE-05	611341	1316397	146	Carlos Cabrera	Hospedaje Jasmin
PE-06	611264	1316472	146	Roberto Colleoni	Fábrica de Químicos
PE-07	611198	1316414	113	Roberto Matuz Meza	Finca Lucrecia
PE-08	609682	1316873	175	Roberto Sánchez	Santa Rosa
PE-09	612731	1311920	252	Gustavo Téllez Martínez	San Ignacio (Pachón)
PE-10	609442	1314215	193	Francisco Alonso López	El Hormigón
PE-11	610354	1317365	120	Iván Wieme	La Flor
MP-01	611796	1315127	114	Basurero	Basurero La Joya
MP-02	611793	1315120	117	Basurero	Basurero La Joya
MP-03	611804	1315122	114	Basurero	Basurero La Joya
MP-04	614759	1318305	48	Zona de descarga	Zona de descarga
MP-05	615427	1317866	73	Zona de descarga	Zona de descarga
MP-06	615980	1317067	49	Zona de descarga	Zona de descarga
MP-07	615277	1317415	52	Zona de descarga	Zona de descarga

PP Pozo perforado  
PE Pozo excavado  
MP Minipiezómetros

**Metodología para el análisis de muestra de agua y lixiviados,  
Procedimientos Operacionales Normalizados (PON) para el análisis de  
muestras de agua (CIRA / UNAN).**

<b>Referencia del laboratorio</b>	<b>Metodología de análisis</b>
PON-HQ-AN-MA-023	COD (Carbono Orgánico Disuelto)*
PON-MP-AA-MA-001	Determinación de Aluminio Total en Agua
PON-MP-AA-MA-002	Determinación de Arsénico Total en Agua
PON-MP-AA-MA-005	Determinación de Cadmio Total en Agua
PON-MP-AA-MA-007	Determinación de Cinc Total en Agua
PON-MP-AA-MA-009	Determinación de Cobre Total en Agua
PON-MP-AA-MA-011	Determinación de Cromo Total en Agua
PON-MP-AA-MA-015	Determinación de Manganeseo Total en Agua
PON-MP-AA-MA-016	Determinación de Mercurio Total en Agua
PON-MP-AA-MA-018	Determinación de Níquel Total en Agua
PON-MP-AA-MA-021	Determinación de Plomo Total en Agua
PON-MP-AA-MA-024	Determinación de Litio Total en Agua
PON-HA-AN-MA-001)	Turbidez en Agua (Método Nefelométrico)
PON-HA-AN-MA-002	pH en Agua Método Potenciométrico
PON-HA-AN-MA-003	Determinación de Conductividad
PON-HA-AN-MA-004	Color verdadero (Comparación Visual)
PON-HA-AN-MA-005	Calcio, Dureza (Método de EDTA)
PON-HA-AN-MA-006	Determinación de Magnesio (Cálculos)
PON-HA-AN-MA-007	Sodio (Emisión de Llama AA)
PON-HA-AN-MA-008	Potasio (Emisión de Llama Fotometría)
PON-HA-AN-MA-011	Alcalinidad (Método Titrimétrico)
PON-HA-AN-MA-012	Nitratos, Cloruros, Sulfatos (Método
PON-HA-AN-MA-013	Nitritos (Método Sulfamida)
PON-HA-AN-MA-014	Fluoruros (Método Colorimétrico)
PON-HA-AN-MA-015	Sílice (Método Molibdosilicato)
PON-HA-AN-MA-016	Hierro Total (Método Colorimétrico)
PON-HA-AN-MA-018	Nitrógeno microKjendahl
PON-HA-AN-MA-019	Amonio (Método Colorimétrico)
PON-HA-AN-MA-020	Nitrógeno Total (Método Espectroscopia)



## Parámetros de campo obtenidos en muestreo de Granada, época seca y lluviosa (2004).

CÓDIGO	Coordenadas (UTM)		pH (unidad de pH)		OD (mg.l <sup>-1</sup> )		E <sub>H</sub> (mv)		E <sub>H</sub> (V)		T (°C)		C.E (μS,cm <sup>-1</sup> )		Salinidad (%)		Alcal. Total (mg.l <sup>-1</sup> )	
	X	Y	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	615618	1315995	6,4	-	4,0	-	362,8	-	0,36	-	30	-	548	-	0,3	-	115	-
PP-02	614784	1316593	6,9	6,8	4,9	3,2	698,5	834,7	0,70	0,83	32	30	372	326	0,2	0,1	106	148
PP-03	614549	1316806	6,8	6,5	4,5	2,8	713,5	871,0	0,71	0,87	32	31	338	372	0,2	0,2	97	142
PP-04	614251	1317177	7,4	7,1	6,6	3,7	206,5	429,3	0,21	0,43	32	31	459	483	0,2	0,2	62	172
PP-05	614047	1317320	6,9	6,8	2,8	2,4	223,0	244,7	0,22	0,24	31	30	518	545	0,2	0,3	81	141
PP-06	613926	1317444	7,3	7,0	5,0	1,5	208,0	482,5	0,21	0,48	32	32	423	434	0,2	0,2	-	143
PP-07	613485	1315317	-	6,6	-	2,0	-	79,3	-	0,08	-	29	-	325	-	0,2	-	172
PP-08	613632	1315790	6,8	6,7	3,0	1,4	30,9	77,6	0,03	0,08	30	30	285	327	0,1	0,2	-	85
PP-09	613830	1316673	6,8	-	3,0	-	210,3	-	0,21	-	30	-	234	-	0,1	-	-	-
PP-10	613729	1316600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-11	613646	1316757	6,9	-	5,0	-	213,4	-	0,21	-	30	-	251	-	0,1	-	-	-
PP-12	613529	1316617	6,9	6,9	4,2	2,1	362,4	624,9	0,36	0,62	31	31	247	274	0,1	0,1	86	183
PP-13	613461	1316703	7,1	6,8	2,7	1,6	270,6	452,0	0,27	0,45	32	31	319	341	0,1	0,2	-	149
PP-14	613329	1316584	7,0	-	4,8	-	263,0	-	0,26	-	30	-	299	-	0,1	-	-	-
PP-15	613321	1316645	-	6,8	-	1,7	-	588,0	-	0,59	-	30	-	298	-	0,1	-	122
PP-16	613317	1316851	7,1	6,9	4,5	2,0	249,6	519,7	0,25	0,52	31	31	330	332	0,2	0,2	-	104
PP-17	612716	1317113	7,6	7,2	6,2	3,2	275,9	366,7	0,28	0,37	31	33	493	481	0,2	0,2	93	134
PP-18	612662	1316909	7,2	6,9	4,9	3,3	258,2	328,0	0,26	0,33	32	32	389	385	0,2	0,2	105	139
PP-19	611981	1317149	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-20	612021	1317057	7,4	7,2	6,0	2,3	271,0	494,1	0,27	0,49	31	31	322	312	0,2	0,1	85	102
PP-21	611414	1316921	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-22	610976	1316477	7,7	7,3	6,2	3,9	312,5	273,2	0,31	0,27	34	34	306	297	0,1	0,1	99	109
PP-23	609803	1316235	7,1	6,7	6,7	4,3	464,6	303,9	0,46	0,30	33	34	337	295	0,2	0,1	85	83
PP-24	610222	1315450	6,8	-	5,9	-	276,4	-	0,28	-	32	-	322	-	0,2	-	-	-
PP-25	610785	1314920	7,3	7,0	6,2	2,8	253,1	592,4	0,25	0,59	31	33	270	260	0,1	0,1	56	108
PP-26	610210	1312053	-	6,5	5,2	2,4	248,5	562,7	0,25	0,56	31	30	255	251	0,1	0,1	54	115
PP-27	609022	1314609	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-28	611345	1317008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31	-	227	-	0,1	-	-
PE-01	615492	1316128	6,7	6,7	5,0	3,2	323,8	679,2	0,32	0,68	30	29	550	908	0,3	0,4	-	308
PE-02	615269	1315863	-	6,6	-	2,4	-	622,4	-	0,62	-	29	-	414	-	0,2	-	134
PE-03	614808	1316580	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE-04	614397	1316810	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE-05	611341	1316397	7,3	-	7,0	-	213,4	-	0,21	-	29	-	225	-	0,1	-	-	-
PE-06	611264	1316472	7,5	7,4	7,4	3,2	348,6	563,6	0,35	0,56	31	29	355	370	0,2	0,2	83	134
PE-07	611198	1316414	7,3	7,0	6,8	3,3	263,0	188,2	0,26	0,19	31	31	341	320	0,2	0,1	83	88
PE-08	609682	1316873	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PE-09	612731	1311920	6,6	6,6	2,0	1,3	319,2	76,1	0,32	0,08	29	25	175	175,9	0,1	0,1	222	88
PE-10	609442	1314215	6,9	-	5,2	-	222,0	-	0,22	-	29	-	320	-	0,2	-	-	-
PE-11	610354	1317365	-	7,4	-	0,6	-	-144,0	-	-0,14	-	29	-	250	-	0,1	-	90
MP-01	611796	1315127	-	7,6	-	0,9	-	122,3	-	0,12	-	31	-	9850	-	5,4	-	-
MP-02	611793	1315120	7,0	-	3,3	-	182,3	-	0,18	-	35	-	11690	-	6,6	-	>LD	-
MP-03	611804	1315122	7,6	7,6	0,5	0,3	94,4	46,2	0,09	0,05	33	32	14990	11410	8,7	6,6	>LD	-
MP-04	614759	1318305	6,9	7,2	2,2	4,1	227,6	57,7	0,23	0,06	31	34	1023	1335	0,5	0,7	177	285
MP-05	615427	1317866	-	7,1	-	2,9	-	183,0	-	0,18	-	34	-	636	-	0,3	-	145
MP-06	615980	1317067	7,3	7,2	3,5	2,9	233,5	80,8	0,23	0,08	32	33	421	397	0,2	0,2	97	86
MP-07	615277	1317415	6,6	6,8	5,0	2,7	43,5	-48,6	0,04	-0,05	31	33	1454	1153	0,7	0,6	162	185
LC-01	615533	1317903	-	8,4	-	4,3	-	142,3	-	0,14	-	32	-	225	-	0,1	-	79
LC-02	616093	1317158	-	8,1	-	4,1	-	53,1	-	0,05	-	30	-	227	-	0,1	-	70

PP Pozo perforado

PE Pozo excavado

MP Minipiezómetro

LC Lago Cocibolca

- No analizado

## Resultados físico – químicos de los muestreos en Granada, época seca y lluviosa (2004).

Punto	Nombre	Turbidez		pH		CE		S. T. D.		C. V.		Dureza Total		Alcalinidad T.	
		(UNT)		(Unidad pH)		(µScm <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		mg.l <sup>-1</sup> Pt-Co		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )	
	LD	0,00		0.1 - 14		0,01		-		5 - 70		0,13		0,62	
	LMA	5		6.5 -8.5		400		1000		15		500		-	
	Epoca de muestreo	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	FAGANIC	0,47	-	6,60	-	549	-	428,91	-	<LD	-	262,81	-	310,63	-
PP-02	Hacienda Quinta Ena	5,82	14,35	7,15	7,37	346	353	289,82	295,08	<LD	5	125,48	126,00	146,60	144,90
PP-03	Quinta Ena No. 3	0,25	-	7,17	-	345	-	292,39	-	<LD	-	125,08	-	147,60	-
PP-04	Quinta Ena No. 1	0,33	0,24	7,17	7,91	500	488	336,00	362,45	<LD	5	159,04	164,75	155,25	159,60
PP-05	Quinta Ena No. 2	0,21	0,26	7,09	7,05	531	555	404,09	408,62	<LD	<LD	189,70	195,92	154,80	155,40
PP-06* <sup>1</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-06* <sup>2</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-08	Finca San Agustín 1	-	270,00	-	6,89	-	233	-	128,85	-	20	-	84,53	-	77,65
PP-12	Barrio Pantanal	0,24	0,36	7,14	7,42	313	294	255,63	257,57	<LD	5	114,57	111,00	143,61	143,85
PP-17	Escudo No. 1	0,28	0,37	7,74	7,85	536	504	361,89	385,50	<LD	5	126,40	125,41	153,90	159,60
PP-20	Felix Pérez	0,32	0,71	7,75	7,79	327	337	247,57	271,86	<LD	5	124,45	133,00	137,25	155,40
PP-22	Policia	1,75	0,38	7,65	7,89	331	297	260,68	274,34	<LD	5	131,85	131,31	150,84	158,55
PP-23	Sistema Penitenciario	0,36	0,29	7,20	7,28	349	329	283,13	287,59	<LD	5	115,06	115,57	141,55	149,10
PP-25	La Chanchera	0,62	1,63	7,65	7,46	266	271	214,41	241,71	<LD	5	98,80	101,00	120,65	115,50
PP-26	Tepeyac	1,43	0,33	6,36	7,68	277	265	237,98	246,28	<LD	5	100,39	101,00	125,25	133,40
PE-02	Tarila	-	1,33	-	7,22	-	416	-	341,15	-	<LD	-	152,16	-	161,70
PE-09	El Pachón	2,42	-	6,92	-	176	-	153,97	-	<LD	-	79,04	-	91,25	-
MP-01	Basurero	-	-	-	-	-	-	-	7294,00	-	-	-	-	-	-
MP-02	Basurero	-	-	-	-	-	-	8111,50	-	-	-	-	-	-	-
MP-03	Basurero	-	-	-	-	-	-	7754,00	8478,00	-	-	-	-	-	-
MP-04	Zona de descarga	3,71	6,07	7,13	7,69	1196	1591	743,29	1057,00	10	25	361,00	541,97	317,05	474,65
MP-05	Zona de descarga	-	18,64	-	7,82	-	644	-	478,70	-	30	-	241,67	-	221,55
MP-06	Zona de descarga	4,46	44,10	7,61	7,74	478	389	312,52	310,50	<LD	20	134,00	156,26	159,00	134,40
MP-07	Zona de descarga	194,80	112,20	6,87	7,06	1660	1474	1284,31	1244,00	250	100	676,00	689,33	372,50	258,35

PP Pozo perforado

PE Pozo excavado

<LD Menor que el límite de detección

LD Límite de detección del método

MP Minipiezómetro

n/d No detectado

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)

\*<sup>1,2</sup>Análisis de NO<sub>3</sub> a 40m y 70m

### Resultados físico – químicos de los muestreos en Granada, época seca y lluviosa (2004).

Punto	Nombre	Ca <sup>+</sup>		Mg <sup>+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub>		S <sup>-</sup>	
		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )	
	LD	0,08		0,20		0,18		0,10		0,25		0,25		1	
	LMA	100		50		200		10		250		250		0,5	
	Epoca de muestreo	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	FAGANIC	66,92	-	23,29	-	28,40	-	8,36	-	5,35	-	<LD	-	<LD	-
PP-02	Hacienda Quinta Ena	35,09	35,27	9,22	9,23	23,05	23,10	6,28	6,11	17,82	18,05	5,94	6,56	<LD	<LD
PP-03	Quinta Ena No. 3	35,88	-	8,64	-	22,95	-	6,33	-	17,84	-	6,40	-	<LD	-
PP-04	Quinta Ena No. 1	23,62	47,70	9,90	11,11	34,10	32,60	7,25	7,31	45,28	42,83	10,52	10,40	<LD	<LD
PP-05	Quinta Ena No. 2	54,25	53,41	13,20	14,50	31,70	32,80	6,83	7,02	54,84	50,98	12,73	12,50	<LD	<LD
PP-06* <sup>1</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-06* <sup>2</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-08	Finca San Agustín 1		23,92		6,04		9,60		4,44		22,42		0,34		<LD
PP-12	Barrio Pantanal	31,67	29,66	8,64	8,99	17,38	18,60	4,42	4,52	7,31	7,31	2,59	3,76	<LD	<LD
PP-17	Escudo No. 1	35,64	38,83	9,12	6,93	52,10	61,50	11,22	11,42	53,76	59,24	14,76	14,97	<LD	<LD
PP-20	Felix Pérez	39,60	42,89	6,24	6,32	8,50	16,80	4,77	4,42	11,12	9,99	1,60	2,97	<LD	<LD
PP-22	Policia	42,75	41,00	6,12	7,05	14,45	13,40	4,27	4,32	3,86	3,59	3,15	3,91	<LD	<LD
PP-23	Sistema Penitenciario	42,75	31,14	6,12	9,20	21,28	21,70	6,01	6,01	2,12	8,63	5,86	6,85	<LD	<LD
PP-25	La Chanchera	23,76	26,05	9,62	8,75	14,52	14,60	4,27	4,42	4,34	4,59	2,36	2,94	<LD	<LD
PP-26	Tepeyac	21,92	22,04	11,11	11,18	15,32	15,20	5,05	5,02	3,39	4,26	1,28	2,24	<LD	<LD
PE-02	Tarila	-	33,88	-	16,43	-	27,10	-	5,23	-	20,55	-	7,95	-	<LD
PE-09	El Pachón	18,61	-	7,92		10,66		3,32		2,73		2,97		<LD	-
MP-01	Basurero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2089,20	-	nd	-	<LD
MP-02	Basurero	-	-	-	-	-	-	-	-	1347,50	-	64,50	-	n/d	-
MP-03	Basurero	-	-	-	-	-	-	-	-	1749,80	2463,53	56,18	53,45	n/d	<LD
MP-04	Zona de descarga	101,00	152,61	26,49	39,17	93,40	157,00	13,30	13,46	131,07	236,62	63,16	91,19	<LD	<LD
MP-05	Zona de descarga	-	64,30	-	19,74	-	58,30	-	4,15	-	54,73	-	29,19	-	<LD
MP-06	Zona de descarga	29,66	38,45	14,58	14,66	40,20	27,00	7,54	5,34	27,18	21,86	21,16	30,19	<LD	<LD
MP-07	Zona de descarga	203,20	203,74	41,10	43,98	100,20	105,00	8,74	5,34	71,99	80,09	550,22	504,22	<LD	<LD

PP Pozo perforado

PE Pozo excavado

<LD Menor que el límite de detección

LD Límite de detección del método

MP Minipiezómetro

n/d No detectado

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)

\*1,2 Análisis de NO<sub>3</sub> a 40m y 70m

### Resultados físico – químicos de los muestreos en Granada, época seca y lluviosa (2004).

Punto	Nombre	Si		Fe <sup>Total</sup>		F <sup>-</sup>		B		NO <sub>3</sub>		NO <sub>2</sub>		NH <sub>4</sub>	
		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )	
	LD	0,20		0,04		0,30		0,02		0,05		0,003		0,005	
	LMA	-		0,3		0,7		0,750		50		3		0,5	
	Epoca de muestreo	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	FAGANIC	102,57	-	0,04	-	0,29	-	0,23	-	7,35	-	<LD	-	0,072	-
PP-02	Hacienda Quinta Ena	94,03	98,50	0,91	2,13	0,29	0,17	0,32	0,28	10,14	11,15	<LD	<LD	0,507	0,017
PP-03	Quinta Ena No. 3	94,42	-	<LD	-	0,29	-	0,31	-	11,08	-	<LD	-	<LD	-
PP-04	Quinta Ena No. 1	91,83	92,51	<LD	<LD	0,24	0,06	0,62	1,03	20,11	22,17	<LD	<LD	0,097	0,040
PP-05	Quinta Ena No. 2	92,98	97,02	<LD	<LD	0,25	0,12	0,66	0,56	44,43	47,03	<LD	<LD	0,095	0,024
PP-06* <sup>1</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	11,07	-	-	-	-	-
PP-06* <sup>2</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	11,87	-	-	-	-	-
PP-08	Finca San Agustin 1	-	15,42	-	28,33	-	0,08	-	0,09	-	<LD	-	0,007	-	0,380
PP-12	Barrio Pantanal	92,98	93,80	<LD	<LD	0,26	0,21	-	0,19	4,21	4,41	<LD	<LD	0,028	0,064
PP-17	Escudo No. 1	86,95	88,85	<LD	<LD	0,30	0,07	1,23	0,12	5,67	7,93	<LD	<LD	<LD	0,040
PP-20	Felix Pérez	84,06	85,28	<LD	<LD	0,25	0,15	0,13	0,17	9,08	9,80	<LD	<LD	<LD	0,024
PP-22	Policia	87,42	97,41	0,07	<LD	0,28	0,09	0,13	0,78	7,88	8,44	<LD	<LD	0,009	0,050
PP-23	Sistema Penitenciario	99,89	101,43	<LD	<LD	0,31	0,12	0,13	0,12	13,86	13,05	<LD	<LD	0,036	0,040
PP-25	La Chanchera	64,96	91,61	<LD	0,21	0,47	0,36	0,12	0,09	17,72	19,09	<LD	<LD	0,012	0,124
PP-26	Tepeyac	98,78	100,40	0,10	<LD	0,35	0,31	0,16	0,19	5,63	5,59	<LD	<LD	0,147	0,021
PE-02	Tarila	-	107,34	-	0,33	-	0,63	-	0,16	-	25,02	-	0,016	-	0,138
PE-09	El Pachón	105,32	-	0,18	-	0,36	-	0,10	-	3,41	-	0,136	-	0,766	-
MP-01	Basurero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	nd	-	nd	-	-
MP-02	Basurero	-	-	n/d	-	-	-	-	-	26,58	-	n/d	-	601,791	-
MP-03	Basurero	-	-	n/d	-	-	-	-	-	310,00	28,57	n/d	nd	154,530	-
MP-04	Zona de descarga	94,57	97,99	0,23	0,72	0,31	0,14	-	1,42	29,76	7,10	0,440	0,256	0,148	0,066
MP-05	Zona de descarga	-	93,82	-	1,47	-	0,17	-	-	-	21,38	-	0,066	-	0,050
MP-06	Zona de descarga	68,94	88,77	0,24	5,63	0,40	0,18	-	0,35	7,46	19,84	0,289	0,214	0,095	0,041
MP-07	Zona de descarga	84,66	80,88	23,01	15,79	0,70	0,52	-	0,95	<LD	<LD	0,011	<LD	0,989	0,685

PP Pozo perforado

MP Minipiezómetro

PE Pozo excavado

n/d No detectado

<LD Menor que el límite de detección

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)

LD Límite de detección del método

\*1,2 Análisis de NO<sub>3</sub> a 40m y 70m

## Resultados físico – químicos de los muestreos en Granada, época seca y lluviosa (2004).

Punto	Nombre	CO <sub>3</sub>		HCO <sub>3</sub>		PO <sub>4</sub>		*COD		Fenol		Ac.&Gr.		DBO <sub>5</sub>		DQO	
		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )		(mg.l <sup>-1</sup> )	
		2		0,75		0,005		0,35		0,005		-		1		10	
	LMA	-		-		-		-		0,002		-		-		-	
	Epoca de muestreo	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno	Verano	Invierno
PP-01	FAGANIC	<LD	-	379,05	-	0,500	-	2,23	-	<LD	-	-	-	-	-	-	-
PP-02	Hacienda Quinta Ena	<LD	<LD	178,89	176,84	0,349	0,254	0,72	1,67	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-03	Quinta Ena No. 3	<LD	-	180,14	-	0,371	-	0,79	-	<LD	-	-	-	-	-	-	-
PP-04	Quinta Ena No. 1	<LD	<LD	189,45	194,78	0,162	0,245	1,18	0,61	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-05	Quinta Ena No. 2	<LD	<LD	188,90	189,65	0,343	0,313	1,17	1,15	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-06* <sup>1</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-06* <sup>2</sup>	Quinta Ena No. 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PP-08	Finca San Agustín 1	-	<LD	-	94,83	-	<LD	-	23,93	-	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-12	Barrio Pantanal	<LD	<LD	175,24	175,55	0,310	0,288	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-17	Escudo No. 1	<LD	<LD	187,85	194,77	0,113	0,138	<LD	0,98	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-20	Felix Pérez	<LD	<LD	167,54	189,65	0,092	0,135	<LD	0,66	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-22	Policia	<LD	<LD	184,07	193,49	0,098	0,120	0,85	0,71	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-23	Sistema Penitenciario	<LD	<LD	172,72	181,96	0,211	0,221	0,68	0,94	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-25	La Chanchera	<LD	<LD	147,23	140,96	0,196	0,162	2,69	0,88	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PP-26	Tepeyac	<LD	<LD	152,82	164,02	0,110	0,607	1,61	0,41	<LD	<LD	-	-	-	-	-	-
PE-02	Tarila	-	<LD	-	197,34	-	0,944	-	2,06	-	<LD	-	-	-	-	-	-
PE-09	El Pachón	<LD	-	111,34	-	0,472	-	3,20	-	<LD	-	-	-	-	-	-	-
MP-01	Basurero	-	-	-	-	-	<LD	-	2626,51	-	0,021	-	9,33	-	231,8	-	1641,90
MP-02	Basurero	-	-	-	-	n/d	-	3927,31	-	0,022	-	91,67	-	580,32	-	2400	-
MP-03	Basurero	-	-	-	-	n/d	<LD	3057,03	3294,61	<LD	0,025	111,50	6,00	373,06	210,48	2000	1515,66
MP-04	Zona de descarga	<LD	<LD	386,87	579,20	0,211	0,248	12,26	25,41	<LD	<LD	-	0,30	-	1,65	-	19,20
MP-05	Zona de descarga	-	<LD	-	271,66	-	0,576	-	19,65	-	<LD	-	0,00	-	2,72	-	14,40
MP-06	Zona de descarga	<LD	<LD	194,04	164,02	0,282	0,215	6,83	13,03	<LD	<LD	-	0,00	-	1,13	-	9,60
MP-07	Zona de descarga	<LD	<LD	454,70	315,23	<LD	0,021	363,51	222,48	0,040	<LD	-	6,90	-	3,3	-	67,14

PP Pozo perforado

PE Pozo excavado

<LD Menor que el límite de detección

LD Límite de detección del método

- No analizado

MP Minipiezómetro

n/d No detectado

LMA Límite máximo admitido (Norma regional CAPRE)

\*<sup>1,2</sup> Análisis de NO<sub>3</sub> a 40m y 70m

Normas de calidad del agua para consumo humano  
Norma Regional CAPRE (1994).  
Parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Unidad	Valor recomendado	Valor máximo admisible
<b>Parámetros organolépticos</b>			
Color verdadero	mg.l <sup>-1</sup> (Pt-Co)	1.00	15.00
Turbiedad	UNT	1.00	5.00
<b>Parámetro físico químicos</b>			
Temperatura	°C	18.00 a 30.00	
pH	valor de pH	6.50 a 8.50	
Cloruros	mg.l <sup>-1</sup>	25.00	250.00
Conductividad	µScm <sup>-1</sup>	400.00	
Dureza	mg.l <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	400.00	500.00
Sulfatos	mg.l <sup>-1</sup>	25.00	250.00
Aluminio	mg.l <sup>-1</sup>		0.20
Calcio	mg.l <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	100.00	
Cobre	mg.l <sup>-1</sup>	1.00	2.00
Magnesio	mg.l <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	30.00	50.00
Sodio	mg.l <sup>-1</sup>	25.00	200.00
Potasio	mg.l <sup>-1</sup>		10.00
Sólidos totales disueltos	mg.l <sup>-1</sup>		1000.00
Zinc	mg.l <sup>-1</sup>		3.00
<b>Sustancia no deseadas</b>			
Nitratos NO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	25.00	50.00
Nitritos NO <sub>2</sub> <sup>1-</sup>	mg.l <sup>-1</sup>		3.00
Amonio	mg.l <sup>-1</sup>	0.05	0.50
Hierro	mg.l <sup>-1</sup>		0.30
Manganeso	mg.l <sup>-1</sup>	0.10	0.50
Fluoruro	mg.l <sup>-1</sup>		0.70
Sulfuro de hidrógeno	mg.l <sup>-1</sup>		0.05
<b>Sustancias inorgánicas</b>			
Arsénico	mg.l <sup>-1</sup>	-	0.01
Cadmio	mg.l <sup>-1</sup>	-	0.05
Cromo	mg.l <sup>-1</sup>	-	0.05
Mercurio	mg.l <sup>-1</sup>	-	0.01
Níquel	mg.l <sup>-1</sup>	-	0.05
Plomo	mg.l <sup>-1</sup>	-	0.01

**Valores guías para la calidad del agua potable**  
**Organización Panamericana de la Salud (OPS, 1987).**

Parámetros	Unidad	Valor Recomendado	Valor máximo admisible
<b>Iones conservativos</b>			
Magnesio	mg.l <sup>-1</sup>	<100	-
Sodio	mg.l <sup>-1</sup>	20	200
Potasio	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Cloruros	mg.l <sup>-1</sup>	200	250
<b>Iones no conservativos</b>			
Calcio	mg.l <sup>-1</sup>	100-300	-
Sulfatos	mg.l <sup>-1</sup>	<400	400
Bicarbonatos	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Carbonatos	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
<b>Macronutrientes</b>			
Nitratos	mg.l <sup>-1</sup>	10	-
Nitritos	mg.l <sup>-1</sup>	1	-
Amonio	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Fósforo total	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Fósforo total disuelto	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Fósforo reactivo disuelto	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Fosfatos	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Dureza total	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Alcalinidad total	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Alcalinidad a la fenolftaleína	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Boro	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Carbono orgánico disuelto	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Fluoruros	mg.l <sup>-1</sup>	<1	1
Hierro total	mg.l <sup>-1</sup>	-	<0.3
Sílice	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Sulfuros	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
<b>Parámetros físicos</b>			
Color verdadero		-	-
Turbidez	UNT	<1	<5
pH	Unidad de pH	6.5 – 8.5	-
Sólidos totales disueltos	mg.l <sup>-1</sup>	<900	<1200
Sólidos totales	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
Conductividad	µScm <sup>-1</sup>	-	-
<b>Residuales</b>			
Compuestos fenólicos	mg.l <sup>-1</sup>	-	1
DBO <sub>5</sub>	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
DQO	mg.l <sup>-1</sup>	-	-

**Valores guías para la calidad del agua potable**  
**Organización Panamericana de la Salud (OPS, 1987).**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Recomendado</b>	<b>Valor máximo admisible</b>
Aceites y grasas	mg.l <sup>-1</sup>	-	-
<b>Metales pesados</b>			
Aluminio total	µg.l <sup>-1</sup>	200	300
Arsénico total	µg.l <sup>-1</sup>	<10	10
Cadmio total	µg.l <sup>-1</sup>	1	10
Cobre total	µg.l <sup>-1</sup>	500	1000
Cromo total	µg.l <sup>-1</sup>	10	40
Litio total	µg.l <sup>-1</sup>	¿?	¿?
Manganeso total	µg.l <sup>-1</sup>	<100	100
Mercurio total	µg.l <sup>-1</sup>	<0.2	-
Níquel total	µg.l <sup>-1</sup>	5 – 20	-
Plomo total	µg.l <sup>-1</sup>	1 – 10	-
Zinc total	µg.l <sup>-1</sup>	<4000	5000



# ANEXO 3

## Datos de campo de las pruebas de infiltración.



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos  
de Nicaragua



**MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA**

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 21/02/04

Ubicación: S de la Joya

Hora Inicio: 09:40:00 a.m.

Hora Final: 03:57:00 p.m.

UTM: 1315047 N

612042 E

Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma: \_\_\_\_\_

Observaciones: Potrero

Pag. 1 de 2

HORA	INTERVALOS	T. (min)	Acum.	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
09:40	0	0		1.50	24.50		
09:41	1	1		2.20	23.80	0.70	420.0
09:42	1	2		3.00	23.00	0.80	480.0
09:43	1	3		3.70	22.30	0.70	420.0
09:44	1	4		4.30	21.70	0.60	360.0
09:45	1	5		5.00	21.00	0.70	420.0
09:46	1	6		5.50	20.50	0.50	300.0
09:47	1	7		6.00	20.00	0.50	300.0
09:48	1	8		6.50	19.50	0.50	300.0
09:49	1	9		6.70	19.30	0.20	120.0
09:50	1	10		6.90	19.10	0.20	120.0
09:51	1	11		7.40	18.60	0.50	300.0
09:52	1	12		7.70	18.30	0.30	180.0
09:53	1	13		8.00	18.00	0.30	180.0
09:54	1	14		8.50	17.50	0.50	300.0
09:55	1	15		8.70	17.30	0.20	120.0
09:56	1	16		9.20	16.80	0.50	300.0
09:57	1	17		9.40	16.60	0.20	120.0
09:58	1	18		9.50	16.50	0.10	60.0
09:59	1	19		10.10	15.90	0.60	360.0
10:00	1	20		10.20	15.80	0.10	60.0
10:01	1	21		10.50	15.50	0.30	180.0
10:02	1	22		10.60	15.40	0.10	60.0
10:03	1	23		11.00	15.00	0.40	240.0
10:04	1	24		11.00	15.00	0.00	240.0
10:05	1	25		11.20	14.80	0.20	120.0
10:06	1	26		11.50	14.50	0.30	180.0
10:07	1	27		11.50	14.50	0.00	180.0
10:08	1	28		11.70	14.30	0.20	120.0
10:09	1	29		12.00	14.00	0.30	180.0
10:10	1	30		12.20	13.80	0.20	120.0
10:12	RELLENADO			0.50	25.50		
10:17	5	35		2.50	23.50	2.00	240.0
10:22	5	40		3.50	22.50	1.00	120.0
10:27	5	45		4.70	21.30	1.20	144.0
10:32	5	50		5.50	20.50	0.80	96.0
10:37	5	55		6.50	19.50	1.00	120.0
10:42	5	60		7.40	18.60	0.90	108.0
10:47	5	65		8.00	18.00	0.60	72.0
10:52	5	70		9.00	17.00	1.00	120.0
10:57	5	75		9.60	16.40	0.60	72.0
11:02	5	80		10.50	15.50	0.90	108.0
11:07	5	85		11.00	15.00	0.50	60.0



**Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua**  
**Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos**  
**de Nicaragua**



**MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA**

Registro de: **Prueba de infiltración (Doble Anillo)**

Fecha: **21/02/2004**

Ubicación: **S de la Joya**

Hora Inicio: **09:40:00 a.m.**

Hora Final: **03:57:00 p.m.**

UTM: **1315047 N**

**612042 E**

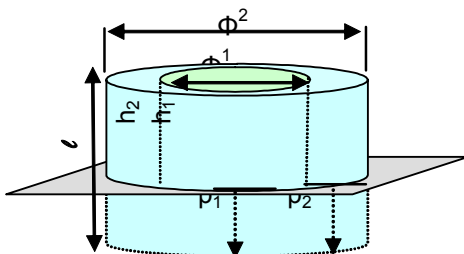
Nombre del analista: **Jorge Guatemala**

Firma:

Observaciones: **Potrero**

**Pag. 2 de 2**

HORA	INTERVALOS	T. (min)	Acum.	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
11:12	5	90		11,60	14,40	0,60	72,0
11:17	5	95		12,50	13,50	0,90	108,0
11:22	5	100		13,20	12,80	0,70	84,0
11:27	5	105		13,60	12,40	0,40	48,0
11:30	RELLENADO			<b>1,00</b>	25,00		
11:40	10	115		3,00	23,00	2,00	120,0
11:50	10	125		4,50	21,50	1,50	90,0
12:00	10	135		5,90	20,10	1,40	84,0
12:10	10	145		7,30	18,70	1,40	84,0
12:20	10	155		8,70	17,30	1,40	84,0
12:30	10	165		10,00	16,00	1,30	78,0
12:40	10	175		11,10	14,90	1,10	66,0
12:50	10	185		12,20	13,80	1,10	66,0
13:00	10	195		13,20	12,80	1,00	60,0
13:04	RELLENADO			<b>0,50</b>	25,50		
13:24	20	215		3,50	22,50	3,00	90,0
13:44	20	235		6,20	19,80	2,70	81,0
14:04	20	255		8,70	17,30	2,50	75,0
14:24	20	275		10,80	15,20	2,10	63,0
14:27	RELLENADO			<b>0,50</b>	25,50		
14:57	30	305		4,50	21,50	4,00	80,0
15:27	30	335		8,50	17,50	4,00	80,0
15:57	30	365		12,00	14,00	3,50	70,0



$\Phi_1$ (cm):	31,0	$\ell_1$ (cm) :	50,5
$\Phi_2$ (cm):	46,0	$\ell_2$ (cm) :	43,0
$P_1$ (cm):	26,0	$h_1$ (cm) :	24,5
$P_2$ (cm):	19,0	$h_2$ (cm) :	24,0

<b>Valor de infiltración</b> (mm/h)	<b>76,67</b>
--	--------------



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos  
de Nicaragua



MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 21/02/04

Ubicación: E La Joya

Hora Inicio: 10:43:00 a.m.

Hora Final: 04:30:00 p.m.

UTM: 1315391 N 612006 E

Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma:

Observaciones: Ronda de arado

Pag. 1 de 2

HORA	INTERVALOS	T. Acum. (min)	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
10:43	0	0	1.00	25.50		
10:44	1	1	1.50	25.00	0.50	300.0
10:45	1	2	2.00	24.50	0.50	300.0
10:46	1	3	3.00	23.50	1.00	300.0
10:47	1	4	3.50	23.00	0.50	300.0
10:48	1	5	3.70	22.80	0.20	120.0
10:49	1	6	4.00	22.50	0.30	180.0
10:50	1	7	4.20	22.30	0.20	120.0
10:51	1	8	4.70	21.80	0.50	300.0
10:52	1	9	4.90	21.60	0.20	120.0
10:53	1	10	4.90	21.60	0.00	120.0
10:54	1	11	5.00	21.50	0.10	60.0
10:55	1	12	5.10	21.40	0.10	60.0
10:56	1	13	5.30	21.20	0.20	120.0
10:57	1	14	5.30	21.20	0.00	120.0
10:58	1	15	5.50	21.00	0.20	120.0
10:59	1	16	5.60	20.90	0.10	60.0
11:00	1	17	5.70	20.80	0.10	60.0
11:01	1	18	5.80	20.70	0.10	60.0
11:02	1	19	5.90	20.60	0.10	60.0
11:03	1	20	6.00	20.50	0.10	60.0
11:04	1	21	6.10	20.40	0.10	60.0
11:05	1	22	6.10	20.40	0.00	60.0
11:06	1	23	6.20	20.30	0.10	60.0
11:07	1	24	6.30	20.20	0.10	60.0
11:08	1	25	6.40	20.10	0.10	60.0
11:09	1	26	6.70	19.80	0.30	180.0
11:10	1	27	6.70	19.80	0.00	180.0
11:15	5	32	7.10	19.40	0.40	48.0
11:20	5	37	7.70	18.80	0.60	72.0
11:25	5	42	8.00	18.50	0.30	36.0
11:30	5	47	8.30	18.20	0.30	36.0
11:35	5	52	8.60	17.90	0.30	36.0
11:40	5	57	9.00	17.50	0.40	48.0
11:45	5	62	9.20	17.30	0.20	24.0
11:50	5	67	9.50	17.00	0.30	36.0
11:55	5	72	10.00	16.50	0.50	60.0
12:00	5	77	10.10	16.40	0.10	12.0
12:00	RELLENADO		0.40	26.10		
12:05	5	82	0.90	25.60	0.50	60.0
12:10	5	87	1.20	25.30	0.30	36.0
12:15	5	92	1.50	25.00	0.30	36.0
12:20	5	97	2.00	24.50	0.50	60.0



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos  
de Nicaragua



MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 21/02/2004

Ubicación: E La Joya

Hora Inicio 10:43:00 a.m.

Hora Final 04:30:00 p.m.

UTM: 1315391 N 612006 E

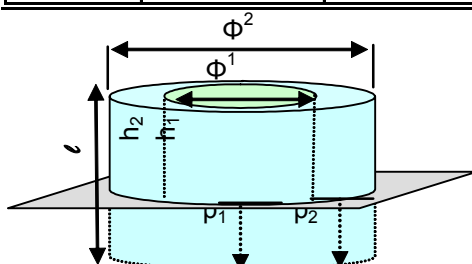
Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma:

Observaciones: Ronda de arado

Pag. 2 de 2

HORA	INTERVALOS	T. Acum. (min)	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
12:25	5	102	2,30	24,20	0,30	36,0
12:30	5	107	2,50	24,00	0,20	24,0
12:35	5	112	3,00	23,50	0,50	60,0
12:40	5	117	3,50	23,00	0,50	60,0
12:45	5	122	3,90	22,60	0,40	48,0
12:50	5	127	4,10	22,40	0,20	24,0
12:55	5	132	4,50	22,00	0,40	48,0
13:00	5	137	5,00	21,50	0,50	60,0
13:10	5	142	5,70	20,80	0,70	84,0
13:20	10	152	6,40	20,10	0,70	42,0
13:30	10	162	7,00	19,50	0,60	36,0
13:40	10	172	7,60	18,90	0,60	36,0
13:50	10	182	8,20	18,30	0,60	36,0
14:00	10	192	8,70	17,80	0,50	30,0
14:00	RELLENADO		0,40	26,10		
14:10	10	202	1,50	25,00	1,10	66,0
14:20	10	212	2,30	24,20	0,80	48,0
14:30	10	222	3,00	23,50	0,70	42,0
14:40	10	232	4,00	22,50	1,00	60,0
14:50	10	242	4,60	21,90	0,60	36,0
15:00	10	252	5,50	21,00	0,90	54,0
15:20	10	262	7,00	19,50	1,50	90,0
15:40	20	282	8,50	18,00	1,50	45,0
15:40	RELLENADO		0,50	26,00		
16:00	20	302	2,10	24,40	1,60	48,0
16:30	30	332	4,70	21,80	2,60	52,0



$\Phi_1$ (cm):	30,5	$\ell_1$ (cm):	51,0
$\Phi_2$ (cm):	46,0	$\ell_2$ (cm):	43,0
$P_1$ (cm):	26,5	$h_1$ (cm):	24,5
$P_2$ (cm):	16,0	$h_2$ (cm):	27,0

Valor de infiltración (mm/h) **48,33**



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos  
de Nicaragua



MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 05/03/04

Ubicación: NW La Joya

Hora Inicio: 09:50:00 a.m.

Hora Final: 04:10:00 p.m.

UTM: 1316982 N 610854 E

Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma:

Observaciones:

Abundante roca volcánica

Pag. 1 de 2

HORA	INTERVALOS	T. (min)	Acum.	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
09:50	0	0		0.00	24.00		
09:51	1	1		0.50	23.50	0.50	300.0
09:52	1	2		0.50	23.50	0.00	300.0
09:53	1	3		1.00	23.00	0.50	300.0
09:54	1	4		1.00	23.00	0.00	300.0
09:55	1	5		1.50	22.50	0.50	300.0
09:56	1	6		1.50	22.50	0.00	300.0
09:57	1	7		1.70	22.30	0.20	120.0
09:58	1	8		2.00	22.00	0.30	180.0
09:59	1	9		2.00	22.00	0.00	180.0
10:00	1	10		2.20	21.80	0.20	120.0
10:01	1	11		2.20	21.80	0.00	120.0
10:02	1	12		2.50	21.50	0.30	180.0
10:03	1	13		2.50	21.50	0.00	180.0
10:04	1	14		2.60	21.40	0.10	60.0
10:05	1	15		2.70	21.30	0.10	60.0
10:06	1	16		3.00	21.00	0.30	180.0
10:07	1	17		3.00	21.00	0.00	180.0
10:08	1	18		3.20	20.80	0.20	120.0
10:09	1	19		3.50	20.50	0.30	180.0
10:10	1	20		3.50	20.50	0.00	180.0
10:11	1	21		3.70	20.30	0.20	120.0
10:12	1	22		3.70	20.30	0.00	120.0
10:13	1	23		3.80	20.20	0.10	60.0
10:14	1	24		3.80	20.20	0.00	60.0
10:15	1	25		4.00	20.00	0.20	120.0
10:16	1	26		4.00	20.00	0.00	120.0
10:17	1	27		4.00	20.00	0.00	120.0
10:18	1	28		4.20	19.80	0.20	120.0
10:19	1	29		4.20	19.80	0.00	120.0
10:20	1	30		4.30	19.70	0.10	60.0
10:21	1	31		4.40	19.60	0.10	60.0
10:22	1	32		4.50	19.50	0.10	60.0
10:23	1	33		4.70	19.30	0.20	120.0
10:24	1	34		4.70	19.30	0.00	120.0
10:25	1	35		4.70	19.30	0.00	120.0
10:25	RELLENADO			0.00	24.00		
10:30	5	40		0.20	23.80	0.20	24.0
10:35	5	45		0.70	23.30	0.50	60.0
10:40	5	50		1.00	23.00	0.30	36.0
10:45	5	55		1.50	22.50	0.50	60.0
10:50	5	60		2.00	22.00	0.50	60.0
10:55	5	65		2.50	21.50	0.50	60.0



**Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua**  
**Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos**  
**de Nicaragua**



**MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA**

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 05/03/2004

Ubicación: NW La Joya

Hora Inicio 09:50:00 a.m.

UTM: 1316982 N      610854 E

Hora Final 04:10:00 p.m.

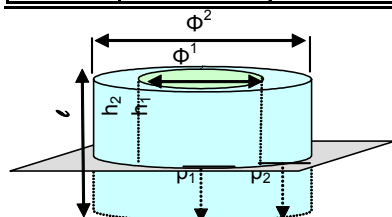
Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma:

Observaciones: Abundante roca volcánica

Pag. 2 de 2

HORA	INTERVALOS	T. Acum. (min)	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
11:00	5	70	3,00	21,00	0,50	60,0
11:00	RELLENADO		0,00	24,00		
11:05	5	75	0,20	23,80	0,20	24,0
11:10	5	80	0,50	23,50	0,30	36,0
11:15	5	85	1,00	23,00	0,50	60,0
11:20	5	90	1,50	22,50	0,50	60,0
11:25	5	95	2,00	22,00	0,50	60,0
11:30	5	100	2,50	21,50	0,50	60,0
11:35	5	105	3,00	21,00	0,50	60,0
11:40	5	110	3,20	20,80	0,20	24,0
11:40	RELLENADO		0,00	24,00		
11:45	5	115	0,50	23,50	0,50	60,0
11:50	5	120	1,00	23,00	0,50	60,0
11:55	5	125	1,50	22,50	0,50	60,0
12:00	5	130	2,00	22,00	0,50	60,0
12:00	RELLENADO		0,00	24,00		
12:10	10	140	0,70	23,30	0,70	42,0
12:20	10	150	1,50	22,50	0,80	48,0
12:30	10	160	2,00	22,00	0,50	30,0
12:40	10	170	3,00	21,00	1,00	60,0
12:50	10	180	3,70	20,30	0,70	42,0
13:00	10	190	4,50	19,50	0,80	48,0
13:10	10	200	5,00	19,00	0,50	30,0
13:10	RELLENADO		0,00	24,00		
13:20	10	210	1,00	23,00	1,00	60,0
13:30	10	220	1,50	22,50	0,50	30,0
13:40	10	230	2,50	21,50	1,00	60,0
13:50	10	240	3,50	20,50	1,00	60,0
14:00	10	250	4,00	20,00	0,50	30,0
14:00	RELLENADO		0,00	24,00		
14:10	10	260	1,00	23,00	1,00	60,0
14:20	10	270	2,00	22,00	1,00	60,0
14:40	20	290	3,50	20,50	1,50	45,0
15:00	20	310	4,50	19,50	1,00	30,0
15:00	RELLENADO		0,00	24,00		
15:20	20	330	2,00	22,00	2,00	60,0
15:40	20	350	3,00	21,00	1,00	30,0
16:10	30	380	6,00	18,00	3,00	60,0



$\Phi_1$  (cm): 30,5     $h_1$  (cm) : 51,0  
 $\Phi_2$  (cm): 46,0     $h_2$  (cm) : 43,0  
 $P_1$ (cm): 24,0     $h_1$ (cm) : 27,0  
 $P_2$ (cm): 18,0     $h_2$ (cm) : 25,0

<b>Valor de infiltración (mm/h)</b>	<b>50,00</b>
---	--------------



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos  
de Nicaragua



MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 05/03/04

Ubicación: N La Joya

Hora Inicio: 08:37:00 a.m.

UTM: 1317106 N 612713 E

Hora Final: 02:58:00 p.m.

Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma:

Observaciones: Area del Pozo el Escudo No. 1

Pag. 1 de 2

HORA	INTERVALOS	T. Acum. (min)	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
08:37	0	0	0.00	18.00		
08:38	1	1	1.50	16.50	1.50	900.0
08:39	1	2	2.30	15.70	0.80	480.0
08:40	1	3	2.50	15.50	0.20	120.0
08:41	1	4	3.20	14.80	0.70	420.0
08:42	1	5	3.70	14.30	0.50	300.0
08:43	1	6	4.20	13.80	0.50	300.0
08:44	1	7	4.50	13.50	0.30	180.0
08:45	1	8	4.80	13.20	0.30	180.0
08:46	1	9	5.00	13.00	0.20	120.0
08:47	1	10	5.40	12.60	0.40	240.0
08:48	1	11	5.70	12.30	0.30	180.0
08:49	1	12	6.10	11.90	0.40	240.0
08:50	1	13	6.40	11.60	0.30	180.0
08:51	1	14	6.60	11.40	0.20	120.0
08:52	1	15	6.70	11.30	0.10	60.0
08:53	1	16	6.90	11.10	0.20	120.0
08:54	1	17	7.00	11.00	0.10	60.0
08:55	1	18	7.20	10.80	0.20	120.0
08:56	1	19	7.30	10.70	0.10	60.0
08:57	1	20	7.50	10.50	0.20	120.0
08:58	1	21	7.70	10.30	0.20	120.0
08:59	1	22	7.90	10.10	0.20	120.0
09:00	1	23	8.00	10.00	0.10	60.0
09:01	1	24	8.10	9.90	0.10	60.0
09:02	1	25	8.30	9.70	0.20	120.0
09:03	1	26	8.40	9.60	0.10	60.0
09:04	1	27	8.50	9.50	0.10	60.0
09:05	1	28	8.60	9.40	0.10	60.0
09:06	1	29	8.70	9.30	0.10	60.0
09:07	1	30	8.80	9.20	0.10	60.0
09:08	RELLENADO		0.00	18.00		
09:13	5	35	0.70	17.30	0.70	84.0
09:18	5	40	1.50	16.50	0.80	96.0
09:23	5	45	2.00	16.00	0.50	60.0
09:28	5	50	2.50	15.50	0.50	60.0
09:33	5	55	3.20	14.80	0.70	84.0
09:38	5	60	3.60	14.40	0.40	48.0
09:43	5	65	4.30	13.70	0.70	84.0
09:48	5	70	4.60	13.40	0.30	36.0
09:53	5	75	5.00	13.00	0.40	48.0
09:58	5	80	5.40	12.60	0.40	48.0
10:03	5	85	5.90	12.10	0.50	60.0





**Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua**  
**Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos**  
**de Nicaragua**



**MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA**

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 05/03/2004

Ubicación: N La Joya

Hora Inicio: 08:37:00 a.m.

Hora Final: 02:58:00 p.m.

UTM: 1317106 N 612713 E

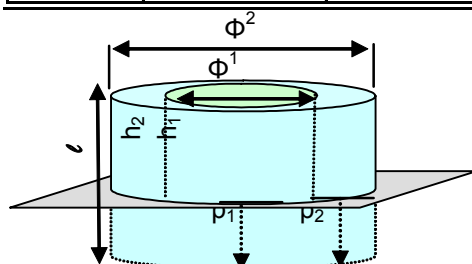
Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma: \_\_\_\_\_

Observaciones: Area del Pozo el Escudo No. 1

Pag. 2 de 2

HORA	INTERVALOS	T. Acum. (min)	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
10:08	5	90	6,20	11,80	0,30	36,0
10:13	5	95	6,40	11,60	0,20	24,0
10:18	5	100	6,50	11,50	0,10	12,0
10:23	5	105	6,70	11,30	0,20	24,0
10:28	5	110	7,10	10,90	0,40	48,0
10:33	5	115	7,50	10,50	0,40	48,0
10:38	5	120	7,80	10,20	0,30	36,0
10:43	5	125	8,00	10,00	0,20	24,0
10:48	5	130	8,20	9,80	0,20	24,0
10:53	5	135	8,60	9,40	0,40	48,0
10:58	5	140	8,90	9,10	0,30	36,0
11:03	5	145	9,20	8,80	0,30	36,0
11:08	5	150	9,40	8,60	0,20	24,0
11:08	RELLENADO		0,00	18,00		
11:18	10	160	1,00	17,00	1,00	60,0
11:28	10	170	1,60	16,40	0,60	36,0
11:38	10	180	2,40	15,60	0,80	48,0
11:48	10	190	3,10	14,90	0,70	42,0
11:58	10	200	3,50	14,50	0,40	24,0
12:08	10	210	4,30	13,70	0,80	48,0
12:28	10	220	5,20	12,80	0,90	54,0
12:48	20	240	6,30	11,70	1,10	33,0
13:08	20	260	7,40	10,60	1,10	33,0
13:28	20	280	8,30	9,70	0,90	27,0
13:58	30	310	9,80	8,20	1,50	30,0
14:28	30	340	13,20	4,80	3,40	68,0
14:58	30	370	16,40	1,60	3,20	64,0



$\Phi_1$ (cm):	30,5	$\ell_1$ (cm) :	51,0
$\Phi_2$ (cm):	46,0	$\ell_2$ (cm) :	43,0
$P_1$ (cm):	18,0	$h_1$ (cm) :	33,0
$P_2$ (cm):	11,5	$h_2$ (cm) :	31,5

<b>Valor de infiltración (mm/h)</b>	<b>54,00</b>
---	--------------



Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos  
de Nicaragua



MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA

Registro de: Prueba de infiltración (Doble Anillo)

Fecha: 28/02/2004

Ubicación: NE La Joya

Hora Inicio: 12:11:00 p.m.

Hora Final: 04:02:00 p.m.

UTM: 1317006 N 614125 E

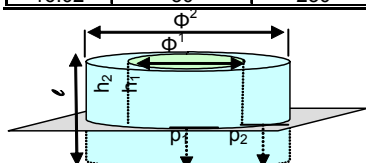
Nombre del analista: Jorge Guatemala

Firma:

Observaciones: Hacienda Quinta Ena Frente a pozo No. 4

Pag. 1 de 1

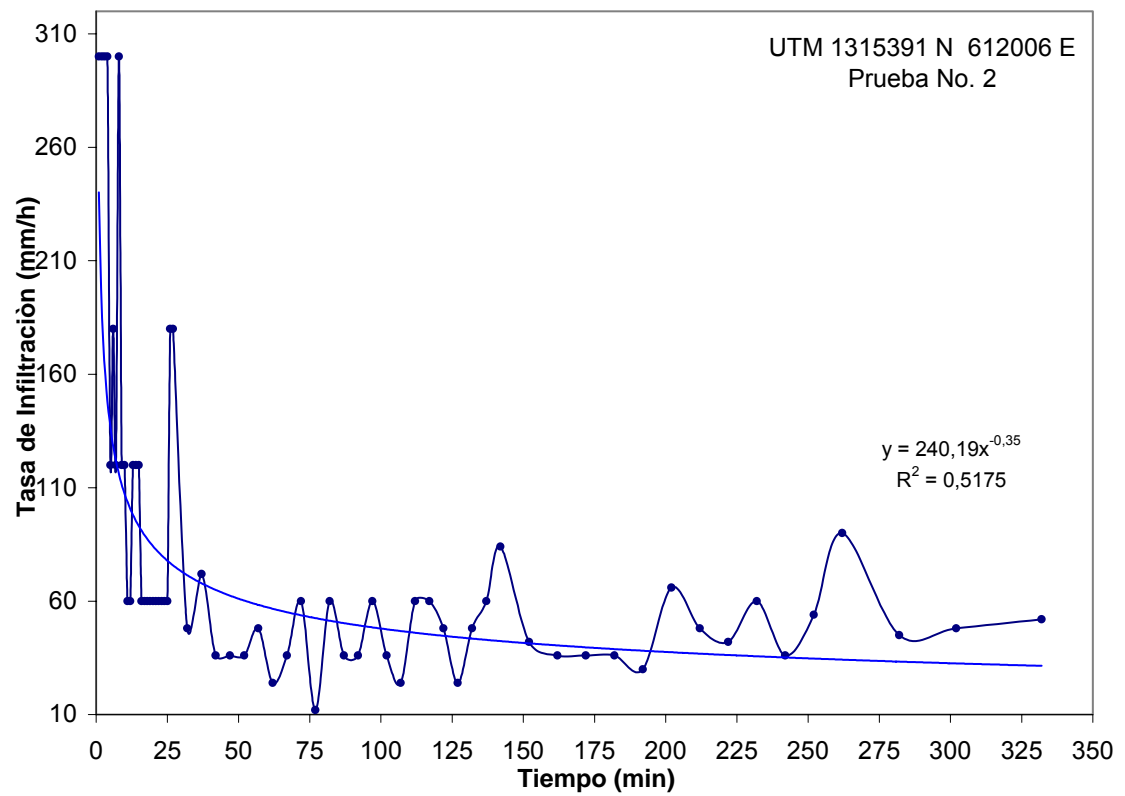
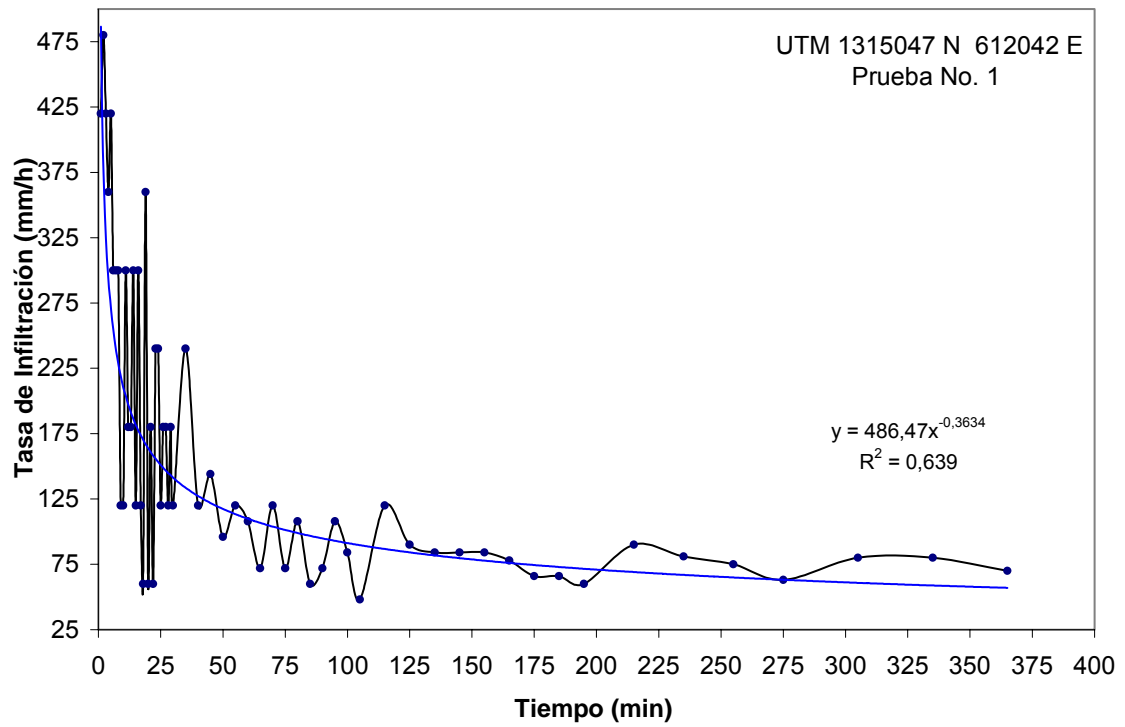
HORA	INTERVALOS	T. (min)	Acum.	Lectura (cm)	Descenso (cm)	Diferencia Lectura(cm)	Infiltración mm/h
12:11	0	0		18,00	14,00		
12:12	1	1		18,00	14,00	1,00	600,0
12:13	1	2		20,00	12,00	2,00	1200,0
12:14	1	3		21,00	11,00	1,00	600,0
12:15	1	4		21,50	10,50	0,50	300,0
12:16	1	5		22,00	10,00	0,50	300,0
12:17	1	6		22,00	10,00	0,00	300,0
12:18	1	7		22,50	9,50	0,50	300,0
12:19	1	8		22,50	9,50	0,00	300,0
12:20	1	9		22,50	9,50	0,00	300,0
12:21	1	10		23,00	9,00	0,50	300,0
12:22	1	11		23,00	9,00	0,00	300,0
12:23	1	12		23,00	9,00	0,00	300,0
12:24	1	13		23,00	9,00	0,00	300,0
12:25	1	14		23,00	9,00	0,00	300,0
12:26	1	15		23,20	8,80	0,20	120,0
12:27	1	16		23,20	8,80	0,00	120,0
12:28	1	17		23,50	8,50	0,30	180,0
12:29	1	18		23,60	8,40	0,10	60,0
12:30	1	19		24,00	8,00	0,40	240,0
12:31	1	20		24,00	8,00	0,00	240,0
12:32	1	21		24,00	8,00	0,00	240,0
12:32	RELLENADO			18,00	14,00		
12:37	5	26		19,00	13,00	1,00	120,0
12:42	5	31		19,50	12,50	0,50	60,0
12:47	5	36		20,00	12,00	0,50	60,0
12:52	5	41		20,20	11,80	0,20	24,0
12:57	5	46		20,60	11,40	0,40	48,0
13:03	6	52		21,00	11,00	0,40	40,0
13:08	5	57		21,30	10,70	0,30	36,0
13:11	3	60		21,70	10,30	0,40	80,0
13:16	5	65		21,90	10,10	0,20	24,0
13:21	5	70		22,00	10,00	0,10	12,0
13:22	RELLENADO			18,00	14,00		
13:32	10	80		18,20	13,80	0,20	12,0
13:42	10	90		19,20	12,80	1,00	60,0
13:52	10	100		19,50	12,50	0,30	18,0
14:02	10	110		20,20	11,80	0,70	42,0
14:12	10	120		20,50	11,50	0,30	18,0
14:12	RELLENADO			18,00	14,00		
14:32	20	140		19,20	12,80	1,20	36,0
14:52	20	160		20,30	11,70	1,10	33,0
15:12	20	180		20,70	11,30	0,40	12,0
15:32	20	200		21,50	10,50	0,80	24,0
16:02	30	230		22,70	9,30	1,20	24,0



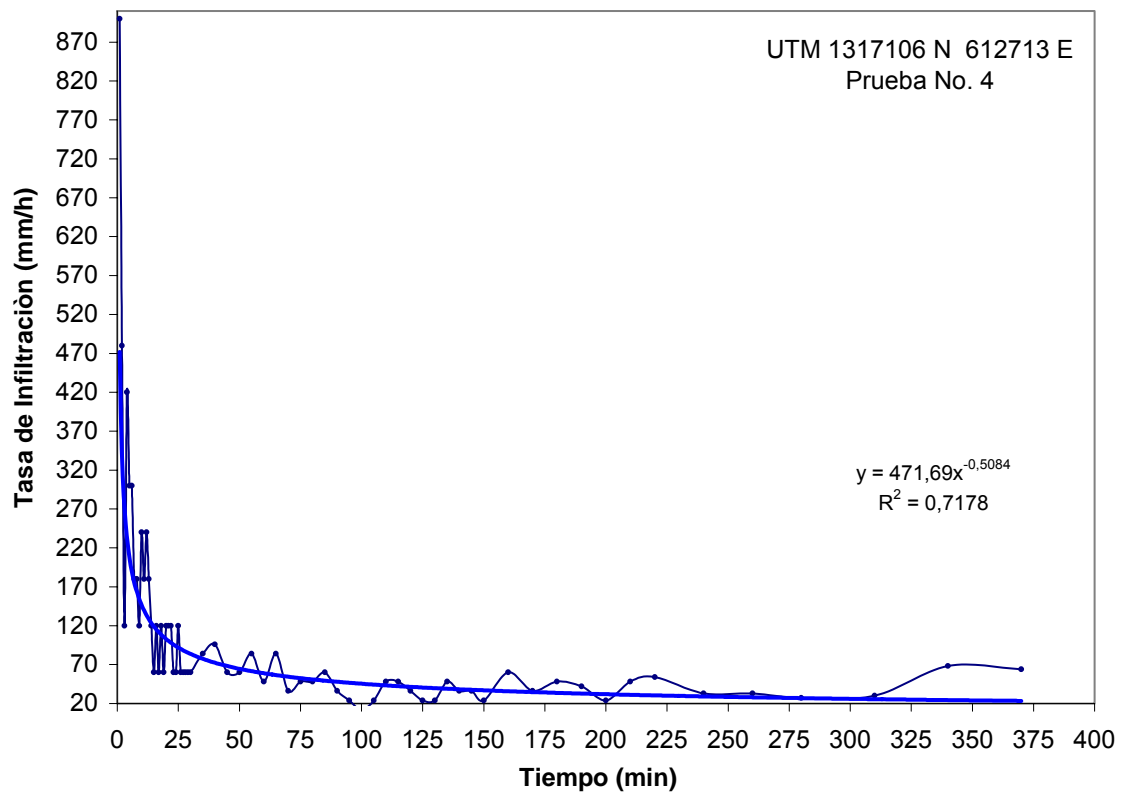
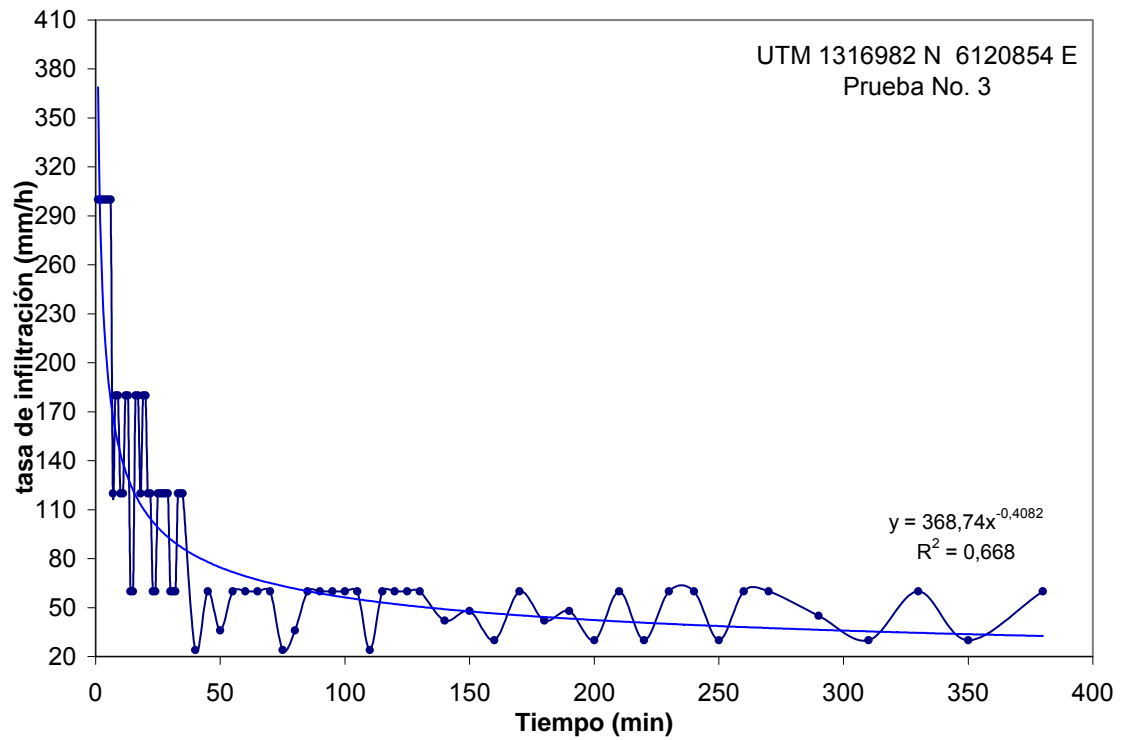
$\Phi_1$  (cm): 30,5  $l_1$  (cm): 51,0  
 $\Phi_2$  (cm): 46,0  $l_2$  (cm): 43,0  
 $P_1$  (cm): 32,0  $h_1$  (cm): 19,0  
 $P_2$  (cm): 6,0  $h_2$  (cm): 37,0

Valor de infiltración (mm/h) **20,00**

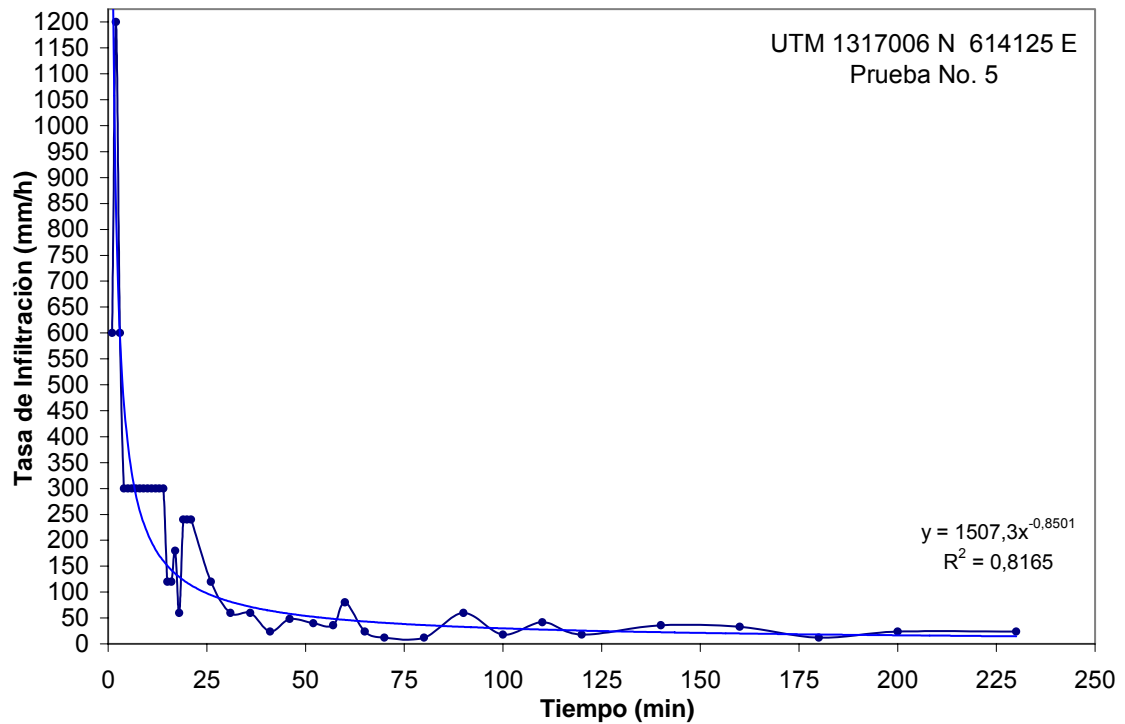
## Gráficos de los datos de infiltración.



### Gráficos de los datos de infiltración.



### Gráficos de los datos de infiltración.



### Tasas de infiltración obtenidas en el área de estudio.

Valores obtenidos en pruebas de infiltración				
No.	COORDENADAS		Tasa Infiltración(fc) mm/h	Tipo de suelo
	X	Y		
1	1315047	612042	76.67	ERb IV
2	1315391	612006	48.33	MV1a VI
3	1316982	610854	50.00	MV1c VI
4	1317106	612713	54.00	GRb II
5	1317006	614125	20.00	Qef VI

**Coeficientes de infiltración propuestos por Schosinsky & Losilla (2000).  
Modelo analítico para determinar infiltración.**

<b>Por textura de suelo:</b>		<b>K<sub>fc</sub></b>
Arcilla Compacta Impermeable		<b>0.10</b>
Combinación de limo y arcilla		<b>0.20</b>
Suelo limo arenosos no muy compacto		<b>0.40</b>
<b>Por pendiente:</b>		<b>K<sub>p</sub></b>
Muy plana	0.02 - 0.06%	<b>0.30</b>
Plana	0.3 - 0.4%	<b>0.20</b>
Algo plana	1.0 - 2.0%	<b>0.15</b>
Promedio	2.0 - 7.0%	<b>0.10</b>
Fuerte	mayor de 7%	<b>0.06</b>
<b>Por Cobertura Vegetal:</b>		<b>K<sub>v</sub></b>
Con zacate menos 50%		<b>0.09</b>
Terrenos cultivados		<b>0.10</b>
Cobertura con pastizales		<b>0.18</b>
Bosques		<b>0.20</b>
Con zacate más del 75%		<b>0.21</b>



**Cálculo del % de Infiltración en el área de estudio de acuerdo al tipo de suelo. Basados en la ecuación de Schosinsky y Losilla (2000).**

<b>No.</b>	<b>Sitio</b>	<b>Coordenadas</b>		<b>P</b> mm/año	<b>f<sub>c</sub></b> mm/h	<b>f<sub>c</sub></b> mm/día	<b>K<sub>p</sub></b>	<b>K<sub>v</sub></b>	<b>K<sub>fc</sub></b>	<b>C</b>		<b>I</b> mm	<b>I</b> %
		<b>X</b>	<b>Y</b>							Calculado	*C Asumido		
1	SE Joya	1315047	612042	1519	76.67	1840	0.15	0.09	1.00	1.24	1.00	1336	88.00
2	E Joya	1315391	612006	1519	48.33	1160	0.15	0.10	0.98	1.23	1.00	1336	88.00
3	NW Joya	1316982	610854	1519	50.00	1200	0.10	0.09	0.99	1.18	1.00	1336	88.00
4	N Joya	1317106	612713	1519	54.00	1296	0.10	0.20	0.99	1.29	1.00	1336	88.00
5	NE Joya	1317006	614125	1519	20.00	480	0.06	0.21	0.85	1.12	1.00	1336	88.00

Donde:

- \* Sí C calculado >1 entonces se asume C = 1
- P Precipitación
- f<sub>c</sub> Infiltración básica
- K<sub>p</sub> Fracción que infiltra por efecto de la pendiente
- K<sub>v</sub> Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal
- K<sub>fc</sub> Fracción que infiltra por efecto de textura del suelo (calculado)
- C Coeficiente de infiltración igual o menor a 1
- I Infiltración

**Formato para la toma de información en el campo de las calicatas  
practicadas en el estudio (Descripción tomada de FAO, 1977).**

 <b>Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua</b> <b>Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de</b> <b>Nicaragua</b> <b>MAESTRIA EN CIENCIAS DEL AGUA</b>			
<b>Registro de: Descripción de perfiles en calicatas (Tomado de la guía para la descripción de perfiles de suelos de la FAO)</b>			
Fecha: / /	Ubicación:	Nombre del analista:	
Hora Inicio: :	Coordenadas:	N	Firma del analista:
Hora Final: :	E	Observaciones:	
<b>I INFORMACIÓN ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA</b>			
a) Numero de Perfil: _____			
b) Nombre del suelo (serie, fase, índice cartográfico, etc.): _____			
_____			
_____			
c) Clasificación a nivel de generalización amplia: _____			
_____			
_____			
d) Fecha de la observación: _____			
e) Autor (es) de la descripción: _____			
_____			
f) Ubicación: _____			
g) Altitud: _____			
h) Forma del Terreno: _____			
i) Posición fisiográfica del sitio _____			
_____			
ii) Forma del terreno circundante _____			
_____			
iii) Microtopografía (si hay) _____			
_____			
i) Pendiente donde el perfil está situado: _____			
j) Vegetación o uso de la tierra: _____			
_____			
_____			
k) Clima: _____			
_____			
<b>OBSERVACIONES:</b> _____			
_____			
_____			
_____			
_____			

a) **Material de partida:** \_\_\_\_\_

a) **Material de partida:** \_\_\_\_\_

<b>b) Drenaje</b>
-------------------

c) Condición de humedad de suelo: \_\_\_\_\_

d) Profundiad de la capa freática: \_\_\_\_\_

e) Presencia de piedras en la superficie o afloramientos rocosos: \_\_\_\_\_

f) Evidencia de erosión:	
--------------------------	--

g) Presencia de sales o álcalis:	
----------------------------------	--

h) Influenza humana:	
----------------------	--

Dos o tres frases que esbozen las características esenciales:

Dos o tres frases que esbocen las características esenciales:

#### IV DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES DEL SUELO:

o del horizonte:

a) Simbolo del horizonte:

**b) Profundidad de la parte superior e inferior del horizonte (en centímetros)**

c) Color: i) en húmedo: \_\_\_\_\_

ii) en seco: \_\_\_\_\_

d) Manchas de color: \_\_\_\_\_

e) Textura: \_\_\_\_\_

f) Estructura:

g) Consistencia:	i) Mojado:	
	ii) Húmedo:	

ii) Húmedo: \_\_\_\_\_

b) Cutaneous (películas sobre agregado), superficies de presión, superficies de deslizamiento, etc.

h) Cutanes (películas sobre agregado), superficies de presión, superficies de deslizamiento, etc.

---

---

---

---

---

---

---

2/3



[illegible]

**Descripción de cada tipo de suelo presente en el área de estudio.  
INETER, 1971.**

**(LGb) La Granadilla franco, 1.5 a 4 por ciento de pendiente.**

Este suelo con pendientes ligeramente inclinadas tiene una extensión total de 5.77 km<sup>2</sup>. En 1969, alrededor del 90 % del área total estaba con algodón, 5 % con maíz y 5 % con pastos y cultivos de subsistencia. El escurrimiento superficial de este suelo es medio y el suelo está levemente erosionado. El suelo es apto para los mismos cultivos que el suelo típico (LGa) y requiere las mismas prácticas naturales. Además necesita un sistema de terrazas con desagües empastados para cultivos anuales de surco. (Unidad de Capacidad ILe – 5.1)

**(ERb) Suelos El Cráter pedregosos, 1.5 a 4 por ciento de pendiente**

La mayoría de estos suelos con pendientes ligeramente inclinadas están localizados al norte del Volcán Mombacho y al noreste de la laguna de Apoyo. Alrededor de dos tercios de estos suelos, son moderadamente superficiales. La mayoría de las otras áreas son profundas. Los suelos tienen escurrimiento superficial moderadamente lento y están levemente erosionados. La extensión total es de 1.15 km<sup>2</sup>. En 1968, el 72 % del área estaba con pastos, 17 % bosques, 6 % café, 4 % maíz o sorgo y 1 % cítricos. Los suelos son más aptos para pastos y bosques. (Unidad de Capacidad IVe – 4.1)

**(ERc) Suelos El Cráter pedregosos, 4 a 8 por ciento de pendiente**

Estos suelos con pendientes inclinadas se encuentran al sureste y norte del Volcán Mombacho. Las profundidades varían de 25 a más de 90 cm. El escurrimiento de estos suelos es moderadamente rápido y los suelos están moderadamente erosionados. La extensión total es de 2.41 km<sup>2</sup>. En 1968, el 55 % del área estaba con pastos, 35 % con bosques, 8 % con maíz y sorgo, 1 % con cítricos y 1 % cultivos de subsistencia. Los suelos están mejor adaptados para pastos y bosques. (Unidad de Capacidad IVe – 4.1)

**(GRb) Granada franco arcilloso, 1.5 a 4 por ciento de pendiente**

Este suelo con pendientes ligeramente inclinadas tiene una extensión de 20.88 km<sup>2</sup>. En 1968, el 50 % del área estaba con pastos, 45 % con algodón y 5 % con maíz y sorgo. El escurrimiento superficial de este suelo es medio y la mayoría de las áreas están levemente erosionadas. El suelo es apto para los mismos cultivos que el suelo típico con pendientes casi planas (GRa) y requiere las mismas prácticas de conservación pero aplicadas con mayor intensidad. La rotación de cultivos es una práctica deseable. (Unidad de capacidad ILe-4.1)

**(GRc) Granada franco arcilloso, 4 a 8 por ciento de pendiente**

Este suelo tiene una extensión total de 11.54 km<sup>2</sup>. En 1968, el 50 % del área estaba con algodón, 48 % con pastos y 2 % con maíz y sorgo. El escurrimiento superficial de este suelo es medio y la mayoría del suelo está moderadamente erosionado.

El suelo es apto para los mismo cultivos que el suelo típico (GRa) y requiere las misma práctica de conservación pero aplicadas con mayor intensidad. Debido a las gradientes de pendiente, las terrazas necesitan desagües empastado o revestidos. La rotación de cultivos es una práctica deseable. (Unidad de capacidad IIIe-4.1)

### **(M2a2) Pantanos y Ciénagas, textura media a fina.**

Este tipo de tierras consiste de suelos que están continuamente Húmedos o inundados en la estación lluviosa, pero suficientemente secos y firmes durante la estación seca para soportar el pastoreo. Durante la estación seca los suelos tienen una tabla de agua alta. Las texturas del suelo son: francas, franco arcillosas, franco arcillo limosas, arcillo limosas y arcillosas. Los suelos se encuentran en las planicies bajas de las costas del mar y de los lagos. Las áreas principales se localizan al sur del Golfo de Fonseca y alrededor del Estero Real y sus tributarios. También se encuentran adyacentes al Estero Padre Ramos, al norte de Tipitapa, a lo largo del Lago de Managua, adyacentes al río Tipitapa, a lo largo del Estero Aserradores, en la costa oeste del Lago de Nicaragua opuesto a Zapatera y en la desembocadura de los ríos Sapoá, Brito, Papalón y Pacora.

Los suelos son aptos para pastos, que pudieran ser mejorados sembrando zacate Alemán por que son resistentes al pobre drenaje. No se debe permitir el pastoreo cuando están muy húmedos, ni se debe dejar crecer mucho el pasto porque se vuelve duro y grueso. El drenaje puede ser mejorado por medio de canales.(Unidad de capacidad VRw-1)

### **(Txa2) Suelos Aluviales, indiferenciados, 0 a 1.5 por ciento de pendiente**

Este tipo de tierra consiste de suelos profundos y moderadamente profundos, bien drenados de texturas variadas. La mayoría de los suelos están sujetos a inundaciones ocasionales. Se encuentran en pequeñas áreas por toda el área del Pacífico.

Los suelos son aptos para maíz, arroz, sorgo, ajonjolí caña de azúcar, algodón y pastos y están usados para estos cultivos. También son aptos para yuca y kenaf. Los suelos de textura más liviana son mejor adaptados para cacao maní, mientras que los de texturas finas son mejor adaptados para caña de azúcar y arroz.

Los suelos tienen una limitación leve para cultivos debido a al erosión Hídrica o las inundaciones ocasionales. Requieren prácticas de conservación tale como canales de intercepción, mínimas labores de labranza, el cultivo en contorno, la incorporación de residuos vegetales al suelo y el uso de fertilizantes. (Unidad de capacidad en las zonas de vida Bosque Tropical Seco y su transición Subtropical y en el Bosque Subtropical húmedo son IIe-4.1; y IIe-4.2 en el Bosque Subtropical Seco).

#### **(TXb4) Suelos Aluviales, superficiales, 1.5 a 4 por ciento de pendiente**

Estos suelos con pendientes ligeramente inclinadas son similares a los que tienen pendientes casi planas (TXa5), pero las texturas son francos, franco arcilloso. Los suelos no son extensos y se encuentran principalmente al oeste de El Sauce entre Villanueva y la Mina El Limón. La mayoría de los suelos son usados para pastos, que es su mejor uso. (Unidad de Capacidad IVe-5a)

#### **(Qfp) Tierras escarpadas moderadas**

Este tipo de tierras incluye suelos con pendientes de 30 a 75 por ciento, que no han sido clasificados en series por falta de suficiente estudio o por carecer de uniformidad en sus características. Este tipo de tierras ha sido clasificado por profundidad, textura del suelo superficial y del subsuelo, y el grado de pedregosidad en las unidades de mapeo.

Los suelos no son aptos para cultivos de surco debido al alto riesgo de erosión y son más aptos para bosques.

#### **(MV1a) Suelos muy superficiales, 15 a 25 centímetros de profundidad, 0 a 1.5 por ciento de pendiente**

Estos suelos tienen escurrimiento superficial lento y el peligro de erosión es nulo. Se encuentran en pequeñas áreas al este de Granada, sobre una vieja colada de lava del Volcán Mombacho, al norte de Villa nueva, al este de Chinandega y cerca de la costa del Lago de Managua en Punta Huete.

Es mejor dejar estos suelos con su vegetación nativa. Sin embargo, la mayoría de las áreas han sido taladas y están con pastos o en barbecho. Los pastos pueden ser mejorados por la siembra de nuevas variedades, pero el pastoreo tiene que ser controlado en estos suelos, cuando hay exceso de lluvias y los suelos se moja demasiado. En estas condiciones el ganado hace charco y se destruye el pasto. (Unidad de Capacidad VI-3)

#### **(MV1c) suelos muy superficiales, 15 a 25 centímetros de profundidad, 4 a 8 por ciento de pendiente**

Estos suelos tienen escurrimiento superficial moderado y la erosión es un riesgo cuando la superficie no tiene una cobertura vegetal. Los suelos se encuentran en áreas con tamaño moderado a pequeños al sureste de Puerto Somoza hoy Puerto Sandino, en la base del Volcán Momotombo, al este de Nagarote en la vecindad de Villanueva y al oeste del Estero Real.

Los suelos están asociados con Vertisoles, Vérticos, Aluviales y con suelos El Cráter, Somotillo, Manzanillo, La Lapa, Monterrosa y Nagarote. Se encuentran en la zona de vida bosque Subtropical Seco, Bosque premontano Tropical Húmedo y Bosque Tropical Seco transición a subtropical.

Los suelos son más aptos para pastos pero el pastoreo debe ser controlado para evitar la destrucción de la cobertura vegetal. (Unidad de Capacidad VI-3)

**(MV1d) Suelos muy superficiales, 15 a 25 centímetros de profundidad, 8 a 15 por ciento de pendiente**

El escurrimiento superficial de este suelo es rápido y el peligro de erosión es severo, especialmente en los suelos que han sido sobre pastoreados. La mayoría de las áreas están moderadamente erosionadas. Las principales áreas se localizan al sureste de Puerto Somoza hoy Puerto Sandino, en la base del Volcán Mombacho, al este de Nagarote, en la vecindad de Villanueva y al este del Estero Real.

Estos suelos están en la misma zona de vida que los suelos muy superficiales con pendientes de 4 a 8 por ciento. La mayoría de los suelos están con pastos y el resto con bosques. (Unidad de Capacidad VIIs-3)

**(MVdp) Suelos muy superficiales, pedregosos, 8 a 15 por ciento de pendiente**

Estos suelos pedregosos son similares a los que se describen con pendientes de 0 a 4 por ciento (MVap), pero tienen escurrimiento superficial más rápido y están más erosionados. Se localizan en la misma área general y se derivan de los mismos tipos de rocas. Estos suelos son más aptos para pastos. (Unidad de Capacidad VIIIs-4)

**(MVcp) Suelos muy superficiales, pedregosos, 4 a 8 por ciento de pendiente**

Estos suelos son similares a los que tienen pendientes de 0 a 4 por ciento (MVap). Tienen escurrimiento superficial más rápido que estos, se encuentran en la misma localidad general y están asociados con ellos. El pasto es el mejor uso para estos suelos. (Unidad de Capacidad VIIIs-3)

**(VCa4) Suelos Vérticos, algo pobremente drenados, 0 a 1.5 por ciento de pendiente.**

Debido al drenaje pobre, estos suelos son más aptos para arroz, caña de azúcar y pastos. (Unidad de Capacidad IVw – 2)

**(TXb) Suelos Aluviales, indiferenciados, 1.5 a 4 por ciento de pendiente**

Estos suelos con pendientes ligeramente inclinadas son similares a los suelos Aluviales indiferenciados con pendientes casi planas (TXa2), pero tienen escurrimiento superficial más rápido. Está asociado con ellos y son pocos extensos. Los suelos son aptos para los mismos cultivos que los (TXa2), y requieren las mismas prácticas de conservación. (Unidad de Capacidad en las zonas de vida Bosque tropical Seco y su transición Subtropical y en el Bosque Subtropical Húmedo son IIe-4.1; y en el Bosque Subtropical seco es IIe-4.2).

**(Qfu) Tierras escarpadas, indiferenciadas, superficiales y muy superficiales, 30 a 75 por ciento de pendiente.**

Este tipo de tierras con pendientes escarpadas, consiste de suelos con una profundidad de 10 a 20 centímetros, bien drenados a excesivamente drenados,

y con texturas superficiales que varían de franco arenoso a arcillosa. Muchos de los suelos están severamente erosionados y han perdido el suelo superficial original. Los suelos se han derivado de toba endurecida de la formación El Tamarindo y algunas rocas de la formación Las Sierras. Estas tierras se encuentran cerca del Volcán San Cristóbal, en la Cordillera de Cerro Grande, en la vecindad de Poneloya, en El Tamarindo, en la isla Momotombito y en las vecindades del Volcán Mombacho y de Nagarote. También limitan con la serie Nejapa en las Sierras de Managua.

Los suelos tienen permeabilidad moderada, pero el escurrimiento superficial es rápido a muy rápido y la capacidad de humedad disponible es baja. Tienen una zona radicular superficial.

Los suelos se encuentran en la mayoría de las zonas de vida incluyendo Bosque Subtropical muy Húmedo, Bosque Tropical Húmedo, Bosque Subtropical Húmedo, Bosque Premontano Tropical Húmedo y Bosque Subtropical Seco. Son más aptos para bosques. Muchos de los suelos están con bosques, pero extensas áreas han sido taladas y se usan para pastos. Muchas áreas han sido sobre pastoreadas resultando en una erosión severa. Todas las áreas necesitan control de pastoreo para evitar la destrucción de la cubierta vegetal protectora. (Unidad de Capacidad VIIc – 4)

**(TCc1) Tierras Coluviales, texturas moderadamente gruesas, 4 a 8 por ciento de pendiente**

Este tipo de tierra con pendientes inclinadas es en su mayoría profundo y moderadamente profundo. Es bien drenado, tiene permeabilidad moderadamente rápida, y capacidad de humedad disponible moderada. Las texturas superficiales son variadas pero los subsuelos son franco arenoso. La mayoría de este tipo de tierra se encuentra en pequeñas áreas al oeste de Chinandega, en la base norte del Volcán Mombacho, en áreas escarpadas entre Managua y la Cordillera del Pacífico y en la vecindad de Villanueva.

El tipo de tierra es usado extensivamente para maíz, sorgo, ajonjolí y pastos. Algunas áreas están con la vegetación nativa y sirven de refugio para la fauna.

Los suelos son moderadamente bien adaptados para maíz, sorgo, ajonjolí y cacao maní, pero los costos de conservación son altos. Como reciben mucho agua de escurrimiento de las áreas adyacentes más elevadas, se requieren canales para interceptar el agua. También se necesita un sistema de terrazas con desagües empastados y una o más de las siguientes prácticas para cultivos anuales de surco. Cultivo en contorno, cultivos en franjas, rotación de cultivos de cobertura y abono verde. La fertilización es esencial para obtener rendimientos satisfactorios. (Unidad de capacidad IIIc-2)

**(TCd1) Tierras Coluviales, texturas moderadamente gruesas, 8 a 15 por ciento de pendiente**

Este tipo de tierra con pendientes fuertemente inclinadas es similar al que tiene pendientes inclinadas (TCc1). Pero tiene escurrimiento superficial más rápido y está algo más erosionado. Se encuentran en la misma localización general. La mayoría de las áreas están con pastos y debido al riesgo de erosión este es su mejor uso. (Unidad de capacidad IVe-2)

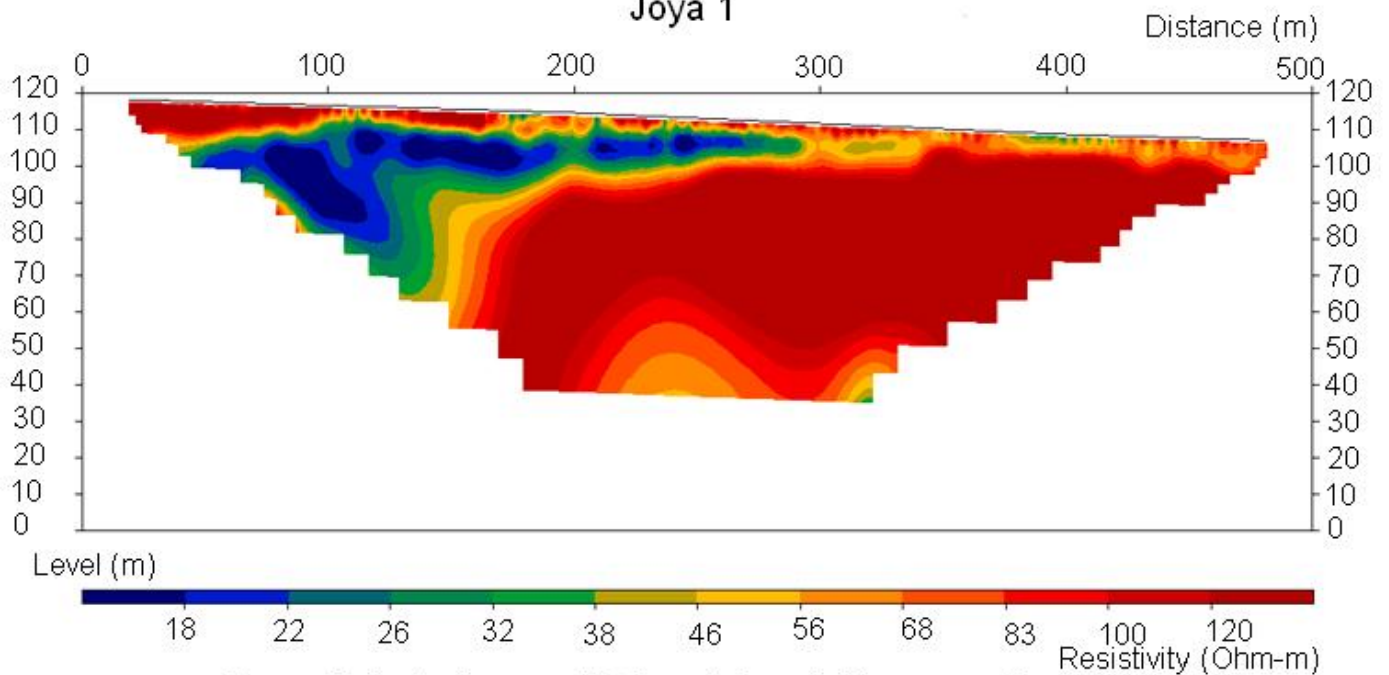
# ANEXO 4



**Imágenes de resistividad eléctrica en los sondeos (SEVC) en el área de estudio.**

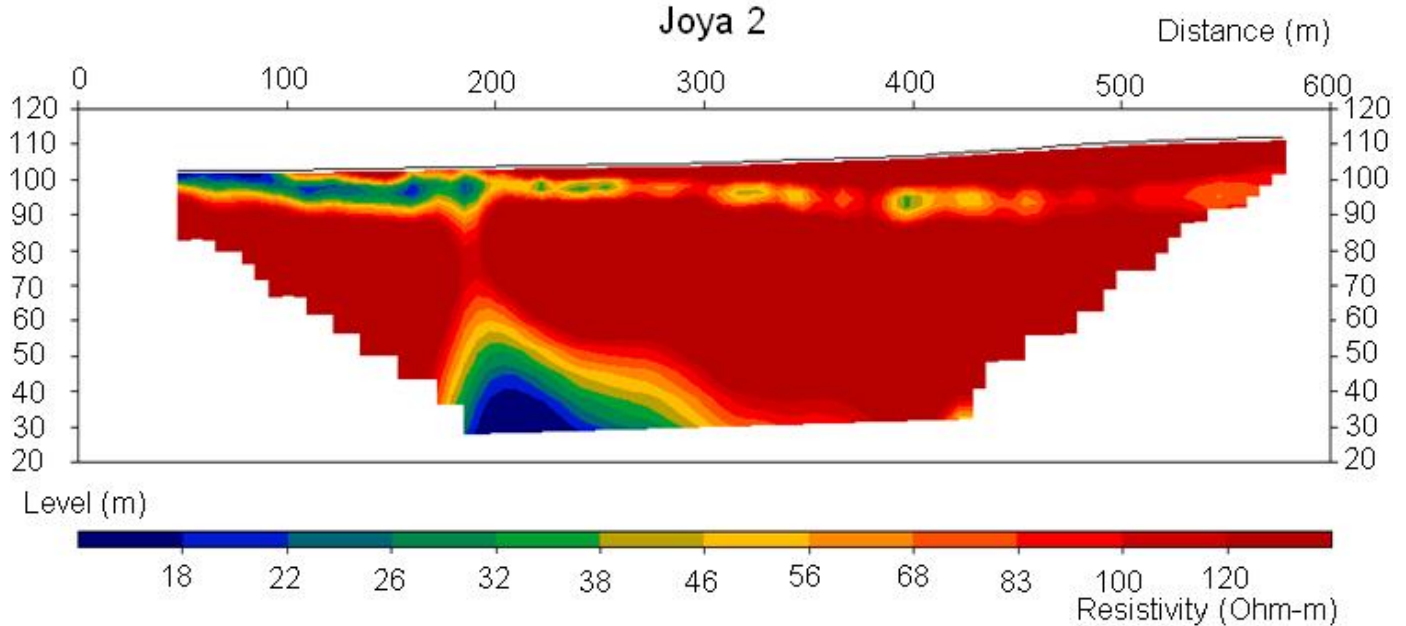
**General electrode array 2D inverted model (mean residual 5.4%)**

**Joya 1**

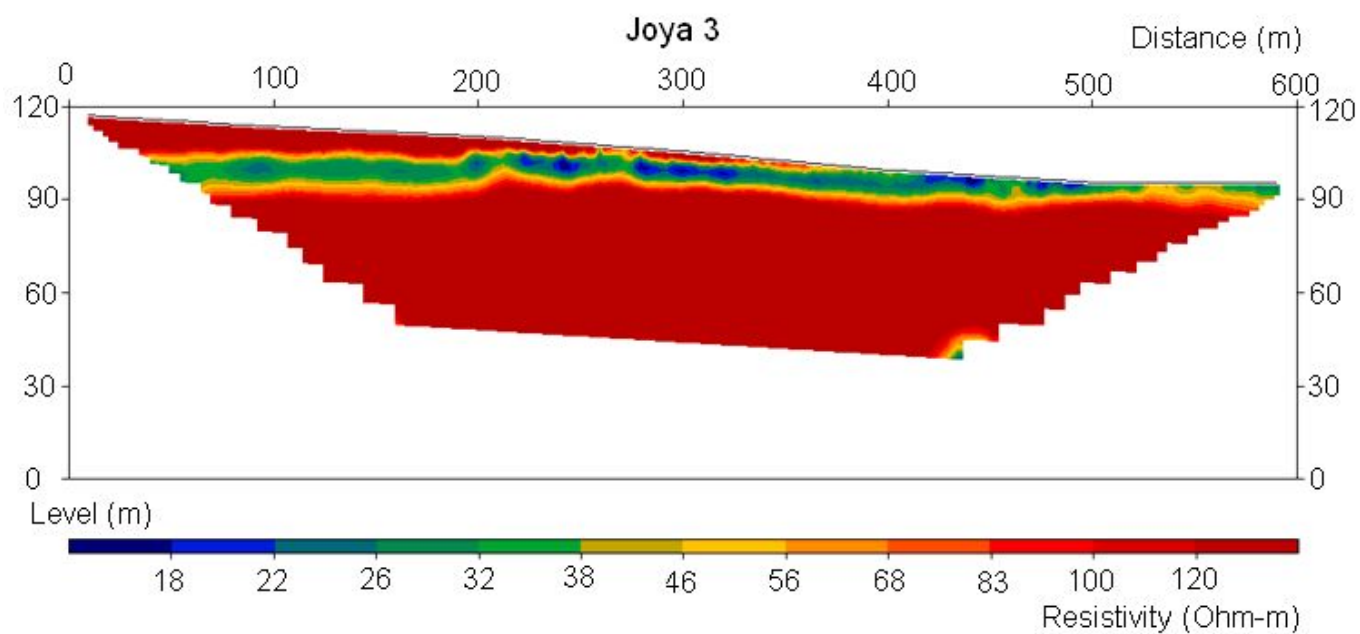


**General electrode array 2D inverted model (mean residual 8.8%)**

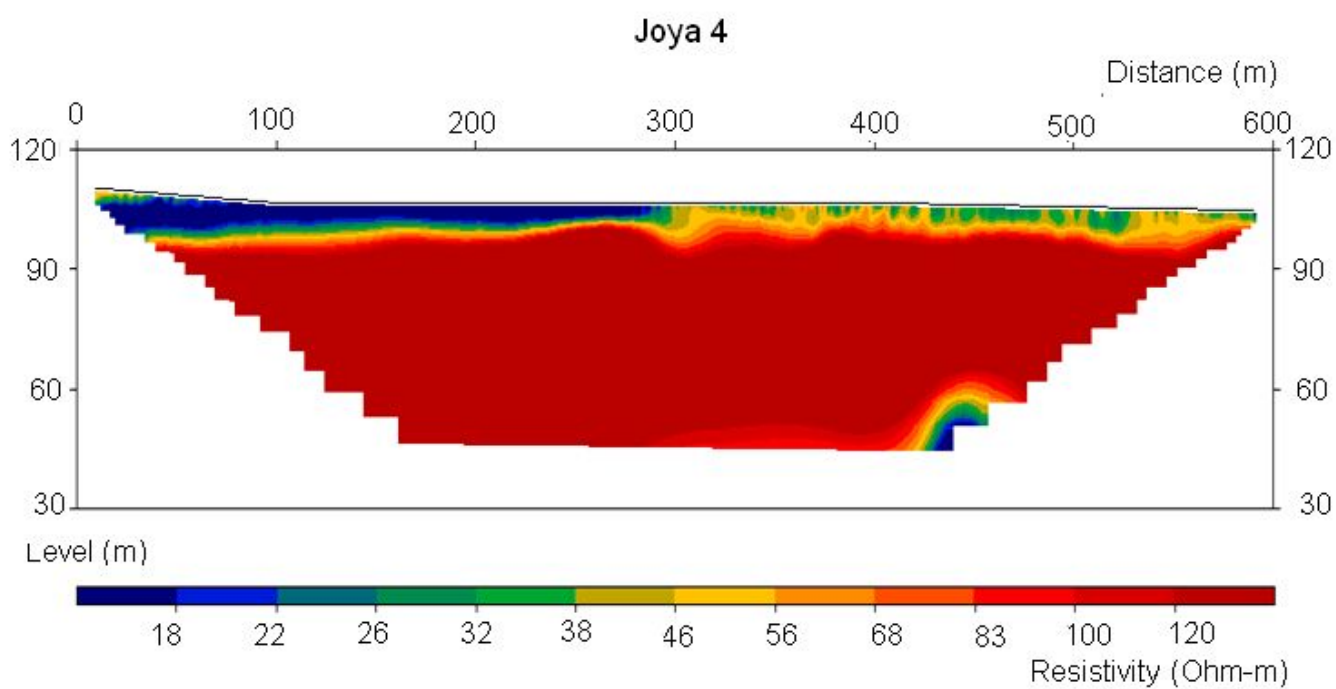
**Joya 2**



Wenner 2D inverted model (mean residual 3.4%)



Wenner 2D inverted model (mean residual 3.1%)



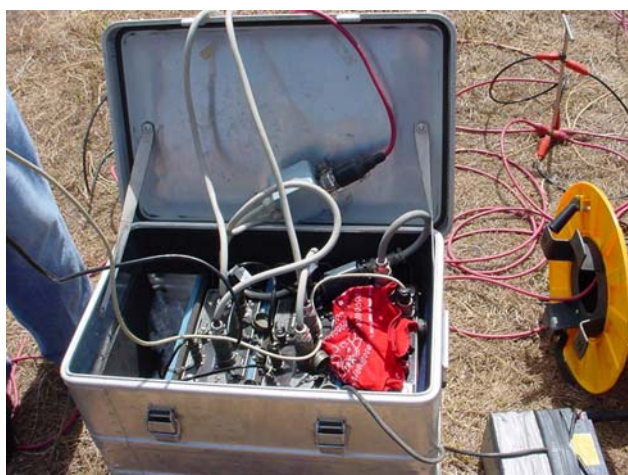
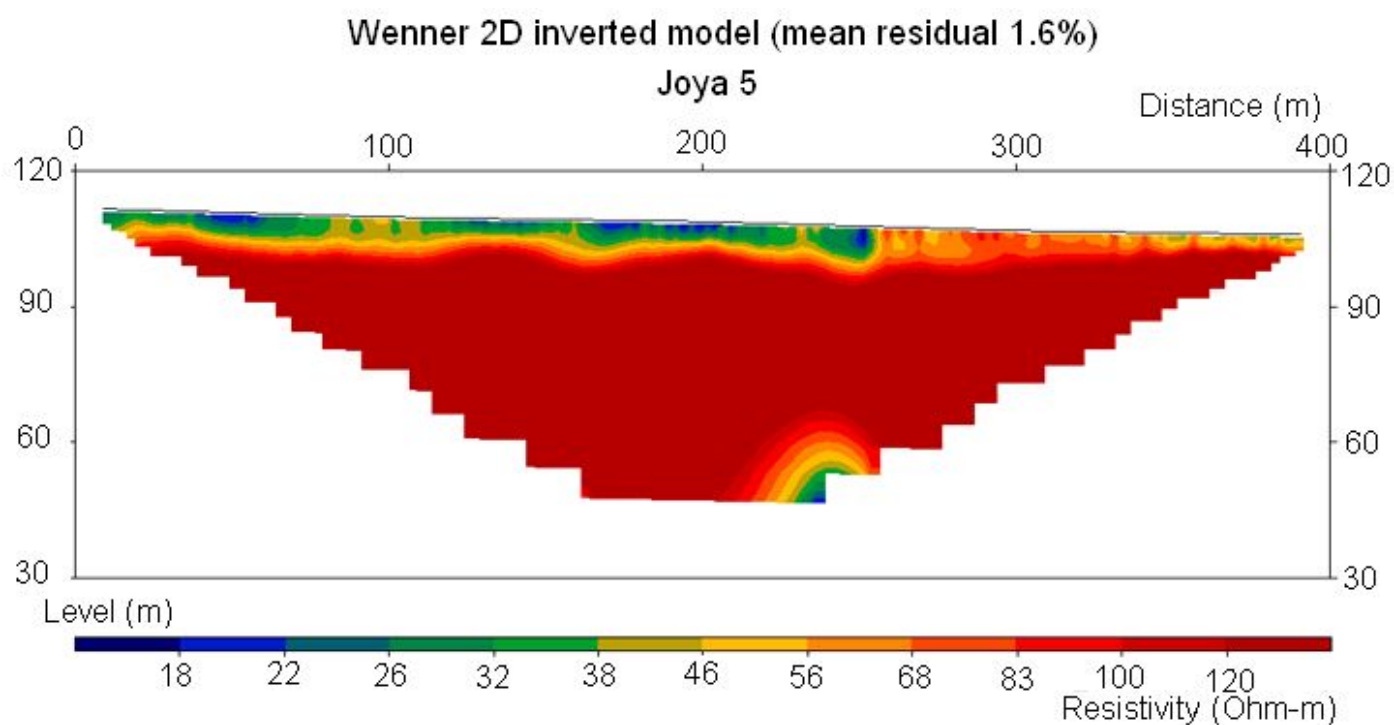


Foto del autor



Fuente: Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada, España.

Equipo utilizado en la realización de la tomografía eléctrica (SEVC) e ilustración de los electrodos y cables.

# ANEXO 5





Basurero La Joya y Volcán Mombacho.



Escurrimiento superficial de lixiviados en época seca.



Toma de muestras en los lixiviados del basurero La Joya.





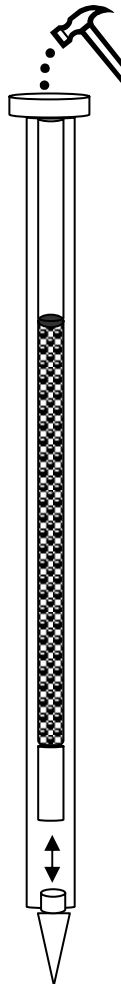
Ejecución de los SEVC, toma de datos con el equipo Terrameter SAS 4000 y la unidad selectora ABEM ES464.



81 electrodos conectados a lo largo de 4 cables de 100 m de longitud, con 21 tomas de electrodos en cada cable, el espacio entre tomas es de 5 m.



Ejecución de las pruebas de infiltración.



Diseño, instalación y muestreo en minipiezómetros en la zona de descarga del área de estudio.